MIEUX ÉVALUER LE BESOIN D'APPLIQUER DES FONGICIDES : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA SCLÉROTINIOSE DU SOYA

231610

04-2023 / 03-2026

RAPPORT D'ÉTAPE

Réalisé par :

Tanya Copley (CÉROM)

Valentin Joubert (CÉROM)

20 février 2026

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.

MIEUX ÉVALUER LE BESOIN D'APPLIQUER DES FONGICIDES : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA SCLÉROTINIOSE DU SOYA

RÉSUMÉ DU PROJET

La sclérotiniose du soya est la maladie la plus importante pour la culture du soya au Québec et survit au champ sous forme de sclérotes pendant 5 à 10 ans. Plusieurs facteurs sont nécessaires afin que la maladie se développe au champ, incluant la présence d'une plante sensible, la présence d'un inoculum et des conditions environnementales favorables au développement de l'agent pathogène et à l'infection de la plante. Les cultivars de soya commercialisés ne sont que partiellement résistants, ce qui oblige souvent les producteurs à faire usage de fongicides pour la gestion de la sclérotiniose. Les niveaux d'infection et l'impact de la maladie sont influencés par la présence d'inoculum et certaines pratiques agricoles, dont le niveau de résistance du cultivar au champ, l'historique de la maladie, la densité de plants au champ, l'espacement entre les rangs, la verse, la fertilisation organique, la durée et le type des rotations et les différents travaux du sol [1, 2]. Des outils d'évaluation de risque du développement de la maladie prenant en compte la présence d'apothécies et certaines pratiques agricoles existent dans le canola et le tournesol, mais pas pour le soya au Québec. Un tel outil aiderait les producteurs à prendre des décisions raisonnées quant à la pertinence d'appliquer ou non des fongicides.

Cette étude vise à développer et à rendre disponible un outil d'aide à la décision (OAD), permettant aux conseillers et aux producteurs de prendre des décisions éclairées concernant la pertinence d'appliquer ou non des fongicides pour le contrôle de la sclérotiniose du soya. Le projet permettra d'identifier les principaux facteurs de risques à prendre en considération et permettra de quantifier le poids de chacun dans un OAD. À terme, l'outil prendra en compte les résultats de dépistage d'apothécies en collaboration avec le Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP) Grandes cultures, ainsi que les prévisions de l'apparition des apothécies calculées par les modèles prévisionnels, et il introduira les facteurs de risque de certaines pratiques agricoles dans le risque global de développement de la maladie au champ.

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

L'objectif général du projet est de développer un outil d'aide à la décision pour la sclérotiniose du soya prenant en compte les modèles prévisionnels climatiques de l'apparition des apothécies et des facteurs agronomiques associés au développement de la maladie, ainsi que d'évaluer l'efficacité d'applications de fongicides.

Suivis chez des producteurs

Afin de mieux connaître les facteurs agronomiques influençant le développement de la sclérotiniose du soya au Québec, jusqu'à une cinquantaine de champs de producteurs ayant un historique de la sclérotiniose et provenant de toutes les régions productrices du soya au Québec ont été suivis annuellement, pour un total de 149 champs suivis au cours des saison 2023 à 2025. Les sites ont été choisis en fonction de plusieurs critères et de façon stratégique pour s'assurer de 1) avoir une bonne représentation de la production de soya selon le niveau de production par région et les différentes pratiques agricoles; 2) bien représenter les régions où les modèles prévisionnels sont moins précis jusqu'à maintenant, mais où la maladie est très courante (par exemple, les régions de l'Estrie, de Chaudière-Appalaches et du Centre-du-Québec seront volontairement surreprésentées); et 3) l'historique de la maladie chez le producteur.

Après avoir choisi les sites, un formulaire a été à remplir en début de saison afin de créer une base de données des différentes pratiques agricoles de chaque ferme, ainsi que l'historique de la maladie. Les informations demandées incluront : le type de travail du sol (semis direct, travail minimum, travail conventionnel), le nombre de passages pour le travail du sol, les cultures en rotation et la durée des rotations, l'utilisation de cultures de couverture et les espèces utilisées, le cultivar de soya, estimé de l'incidence et de la sévérité de la maladie dans le passé, l'écartement entre les rangs, le taux de semis pour l'année du projet et dans le passé, les méthodes de contrôle des mauvaises herbes (mécanique ou chimique, incluant les herbicides utilisés), l'utilisation de fertilisants (chimiques, fumiers, lisiers) et le nombre d'applications, la quantité de fertilisant appliquée par rapport à la quantité recommandée (c.à.d., sous-fertilisé, sur-fertilisé ou quantité appropriée, moment de l'application), le traitement de semence, le type de sol, le pourcentage de matière organique, la date de semis, l'historique de l'utilisation de fongicides foliaires dans les 5 dernières années, la compaction, etc. (**Annexe 1**).

Pendant la saison, les participants ont fait des visites au champ une fois par semaine dès la dernière semaine de juin et ce jusqu'à la fin juillet afin d'évaluer différents paramètres dans trois quadrats. Un

formulaire a été à remplir pour chaque visite et incluait les informations suivantes : l'humidité du sol estimé dans les 5 premiers centimètres (sec, humide, très humide), le stade du soya, la verse et la fermeture des rangs. Pour un maximum de 20 champs, en collaboration avec le RAP-GC, un dépôt de sclérotes contenant 14 sclérotes chaque a été installé dans chaque quadrat et a été dépisté pour la présence d'apothécies lors de chaque visite. Après chaque visite, un niveau de risque a été attribué à chaque champ en utilisant des poids de chaque pratique agricole dans un formulaire Excel, ci-après connu comme l'outil d'aide à la décision. Au stade R6.5 à R7, l'indice de sévérité de la sclérotiniose (DSI) a été calculé en attribuant une cote de 0 à 3 pour 30 plantes (15 par rang) par quadrat selon l'échelle suivante : 0, aucune maladie présente; 1, maladie sur les branches latérales seulement; 2, maladie sur la tige principale, mais gousses en santé; 3, gousses atteintes, plantes flétries ou mortes.

Essais de fongicides

Afin d'évaluer l'efficacité et la rentabilité des applications de fongicides et de mieux évaluer les seuils de risques de l'outil développé, un maximum de 10 champs ont été choisis annuellement pour faire des tests de fongicides, pour un maximum de 30 champs durant toute la durée du projet. Pour s'assurer que les traitements soient bien planifiés, les champs ont été choisis en début de saison de façon stratégique selon l'importance de la maladie dans les différentes régions. Les champs ont été distribués dans des régions combinant une forte pression de la maladie et des tendances à appliquer des fongicides foliaires, avec la possibilité d'avoir quelques champs en région(s) où la maladie est moins importante, comme en Montérégie, afin de servir comme témoins

Les traitements de fongicides ont été faits en bandes, à raison d'une à trois bandes par traitement. Les traitements incluaient un traitement témoin sans fongicide et un traitement avec un fongicide foliaire au choix du producteur. Pour chaque champ suivi, les données de rendement et les cotes de la maladie seront prises dans un minimum de trois quadrats ou bandes par traitement.

Statistiques et outil d'aide à la décision

Des ANOVA et des corrélations ont été faites entres le DSI et les différentes variables agronomiques pour identifier les facteurs ayant le plus d'impact sur le développement de la maladie. Des évaluations d'apprentissage automatique d'amplification de gradient, plus spécifiquement par arbre de régression à gradient amélioré (*Gradient boosted tree (BRT)*) avec les paquets dismo et gbm et forêt d'arbres de décision (*Random Forest (RF)*) avec le paquet randomForest, ont été évalués comme méthode de

développement de modèles dans R statistiques. Pour tous les modèles (ANOVA, BRT et RF), les modèles ont été développés avec une base de données d'apprentissage (training set) et évalués avec une base de données test (test set). Différents seuils de développement de modèles ont été évalues en divisant les bases de données d'apprentissage versus test selon les ratios suivants : 70 %-30 % ou 80 %-20%. Les ratios de positifs versus négatifs (avec ou sans maladie) ont été maintenus dans les bases de données d'apprentissage et de test afin de représenter le ratio de positifs et négatifs originaux dans les données originales (soit de 14 % à 18 % de positifs dans chaque base de données selon les différents seuils de DSI). Les modèles ont aussi été évalués selon différents seuils de DSI comme positif, soit des DSI de 10 %, 15 % ou 20 %, des seuils similaires au seuil de 22 % proposé par Fall et al. [4]. Des seuils en haut de 20 % n'ont pas pu être évalués en raison d'une faible quantité de champs ayant de forte pression de la sclérotiniose.

Après avoir identifié les variables les plus importantes, un système de pointage a été établi pour chacun des facteurs avec : 0 indiquant un faible risque, 5 un moyen risque ou 10 un haut risque pour le développement de la maladie (par exemple, 0 points pour un écartement de rang de 30 pouces, 5 points pour 15 pouces et 10 points pour 7 pouces). Chaque facteur agronomique, en plus des prédictions des modèles prévisionnels, a reçu son propre système de points, et l'addition de tous les points indique le niveau de risque pour le développement de la maladie. Ce système est basé sur le système de pointage pour la sclérotiniose du canola, dans lequel un résultat de < 20 points indique un faible risque de développement de la maladie, 20 à 24 points un risque moyen et ≥ 25 points un haut risque. Les seuils de points associés avec chaque facteur ont été adaptés selon les résultats statistiques, le nombre de facteurs incluent dans l'outil et le niveau de maladie observé au champ pendant les trois années de l'étude. Les seuils de DSI utilisés pour les différents niveaux de risque ont été déterminés selon les seuils établis par Fall et al. [4], soit un seuil de 20% DSI pour un haut risque de maladie, 10 % à 20 %% DSI pour un risque moyen et <10% pour un risque faible.

Essais de fongicides et rentabilité des applications de fongicides foliaires

Pour évaluer la nécessité d'utiliser des fongicides, ainsi que leur efficacité et rentabilité, les résultats de DSI et de rendement seront comparés par ANOVA avec les traitements comme facteur fixe et le champ comme facteur variable. En utilisant le gain de rendement associé avec les applications de fongicides (Gain = rendement avec fongicides – rendement sans fongicides), des analyses de l'impact de la sclérotiniose sur le rendement ont été effectuées en utilisant un modèle linéaire approprié aux données (selon le nombre de traitements fongicides utilisés, le niveau de DSI ou de catégories DSI et le(s) moment(s) d'application et la distribution des variables), permettant d'établir un seuil de pertes de rendement par rapport aux gains économiques associés à l'application de fongicides [5].

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

Suivis chez des producteurs

Au total, 47, 56 et 46 sites ont été suivis en 2023, 2024 et 2025, respectivement, et étaient bien repartis dans les différentes régions productrices du soya (**Annexe 2**). Seule la région de Lanaudière n'avait pas de sites. Tous les responsables de sites ont rempli un formulaire de pratiques agricoles et de l'historique du champ qui servait à recueillir les informations sur 43 différents facteurs (**Annexe 1**). Le DSI moyen pour les sites était de 13,5 %, de 4,0 % et de 1,0 % en 2023, 2024 et 2025, respectivement, pour une moyenne de 6,2 % sur les trois ans de l'étude. Les moyennes de DSI étaient en dessous du seuil économique de 20 % des É.-U [4]. Le DSI variait de 0 % à 70,5 % en 2023, de 0 % à 50 % en 2024 et de 0 % à 25,7 % en 2025. En 2023, 13 sites avaient un DSI au-dessus du seuil économique (21,5 % à 70,5 %), tandis que seulement quatre sites dépassaient le seuil en 2024 (20,6 % à 50,0 %) et un site en 2025 (25,7 %) (**Figure 1**).

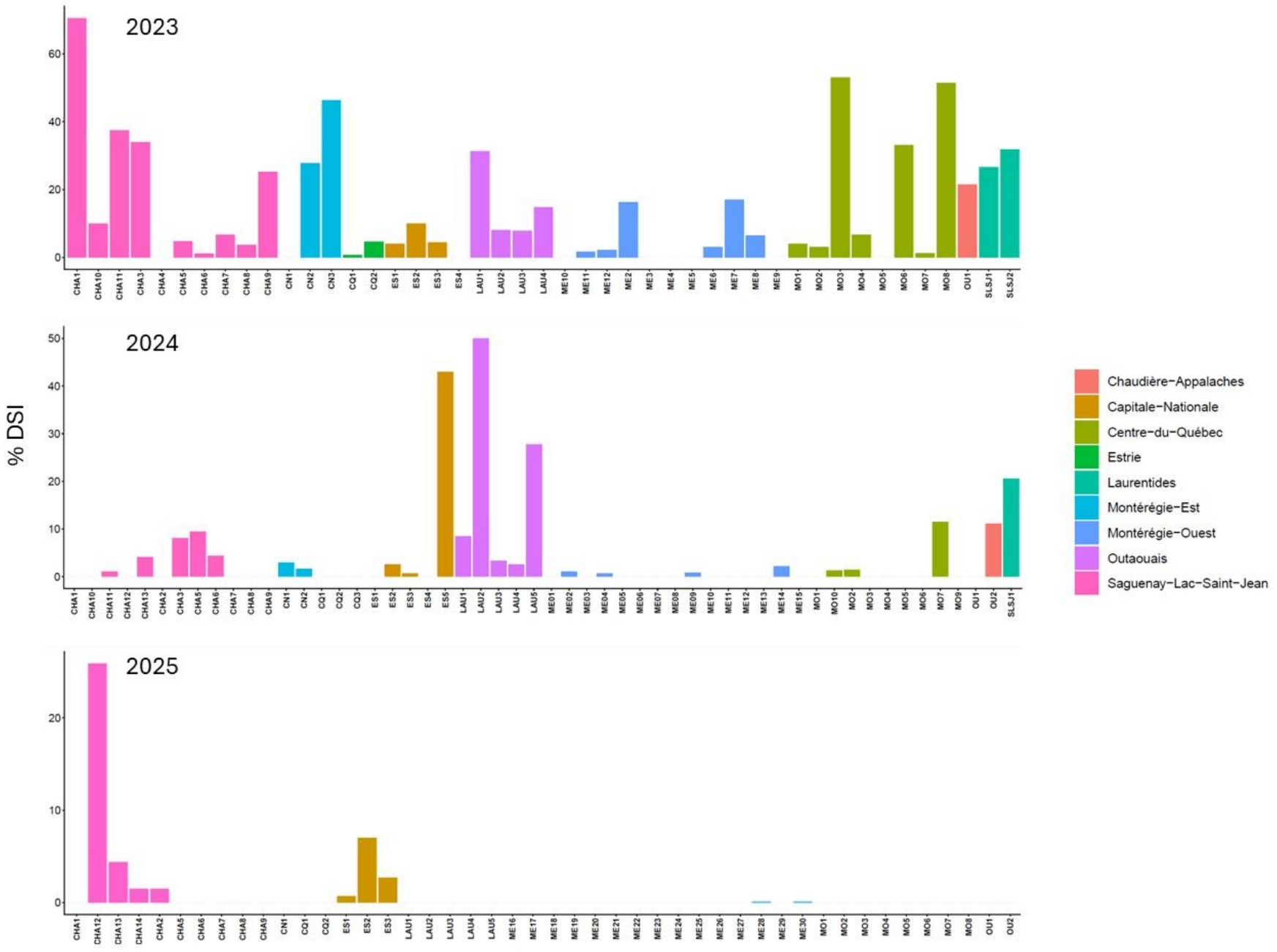

2023
2024
2025
% DSI
Chaudière−Appalaches
Capitale−Nationale
Centre−du−Québec
Estrie
Laurentides
Montérégie−Est
Montérégie−Ouest
Outaouais
Saguenay−Lac−Saint−Jean

Figure 1. Indice de sévérité (% DSI) moyen par champ suivi en 2023, 2024 et 2025. CHA, Chaudière-Appalaches; CN, Capitale-Nationale; CQ, Centre-du-Québec; ES, Estrie; LAU, Laurentides; ME, Montérégie-Est; MO, Montérégie-Ouest; OU, Outaouais; SLSJ, Saguenay-Lac-Saint-Jean. Le DSI moyen pour les sites était de 13,5 %, de 4,0 % et de 1,0 % en 2023, 2024 et 2025, respectivement

Essais de fongicides

Des essais de fongicides ont été mis en place chez 26 producteurs au cours des trois années. Les essais ont été réalisés en bandes avec un minimum d'une bande par traitement (fongicide de choix sélectionné par le producteur par rapport au témoin sans fongicide) et un minimum de trois parcelles de récolte par traitement, sauf pour un site pour lequel seulement deux récoltes par bande ont été réalisées. Un site a dû être abandonné en raison de l'écrasement des plantes par une bâche s'étant affaissée à la suite d'une forte pluie. Au total, ce sont 25 sites pour lesquels des récoltes ont eu lieu. Tous les sites ont reçu une application de fongicide, sauf cinq sites qui ont reçu deux applications de fongicides. Un producteur a fait des bandes selon son régime (deux applications) et selon l'outil d'aide à la décision et les modèles prévisionnels (une application seulement). Les analyses statistiques démontrent une faible interaction significative entre le champ et le traitement de fongicide (P=0,0285) suggérant que les applications de fongicide ont pu réduire de façon significative le DSI dans un champ. Cependant, une tendance de réduction du DSI peut être observée dans la majorité des champs (**Figure 3**). Le manque de différence significative observé dans la majorité des champs est dû à la grande variabilité du DSI dans chaque parcelle. Les analyses statistiques ont démontré une interaction significative au niveau des rendements (P=0,0002), suggérant que les applications de fongicides ont pu augmenter les rendements dans un champ (**Figure 3**).

Malgré l'absence général de différences significatives au niveau du DSI et des rendements, les analyses de rentabilité ont démontré que les applications de fongicides ont favorisé des gains économiques dans 6 des 9 (66,7 %) sites en 2023, 3 des 9 sites (33,3 %) en 2024 et 3 des 6 sites (50 %) en 2025 (**Tableau 1**). Pour certains des sites, les gains économiques sont probablement dus à une réduction de la sclérotiniose du soya (en 2023 les sites CHA1, MO1, et CHA2), tandis que pour d'autres, ils seraient attribuables à la réduction d'autres maladies, comme le cas de LAU1 en 2023 qui avait une incidence de 50 % de grains démontrant de symptômes de *Phomopsis* sp. dans les parcelles témoins et 20 % dans les parcelles traitées avec le fongicide. Pour le CQ1 en 2023, un grand foyer de la pourriture phytophthoréenne a été observé dans une bande de témoin, expliquant les gains économiques observés. Pour les autres sites, aucune autre

maladie n'a été rapportée et les raisons de rentabilité des applications de fongicides demeurent incertaines. Les augmentations de rendement dues aux applications de Cotegra (groupes FRAC 3 et 7) en 2025, une année marquée par une période prolongée de sécheresse et chaleur, pourrait s'expliquer par la capacité de certains fongicides à augmenter la résistance à la sécheresse [6-7].

Développement de l'outil d'aide à la décision

Afin de développer un outil d'aide à la décision, des analyses de corrélation, d'ANOVA, par arbre de régression à gradient amélioré (*Boosted regression tree*, BRT) et par forêt d'arbres de décision (*Random Forest (RF)*) ont été réalisées pour évaluer l'effet des différentes variables pour la présence de la sclérotiniose du soya. Pour se faire, différents seuils de tolérance de DSI ont été transformés en données binomiales, soit une présence en haut d'un DSI de 10, présence en haut d'un DSI de 15 ou présence en haut d'un DSI de 20 (seuil économique des É.-U.). Les facteurs ont été évalués soient selon leurs vrais valeurs, ou ont été transformés pour déterminer si certains facteurs devraient être regroupés (par exemple, garder les écartements de rangs de 7 pouces et les rangs doubles séparés ou regroupés ensemble, ou garder les différents types d'engrais séparés ou regroupés tous les type de fumiers ensembles ou tous les types de lisiers ensembles) (**Annexe 3**). Les données ont ensuite été divisées en base de données de formation (« training set ») ou de test (« test set ») à une proportion de 70 % et 30 % des données ou 80 % et 20 %, respectivement. Pour chaque base de données, la proportion de présences (avec DSI selon les différents seuils) et d'absences (sans DSI selon les différents seuils) a été conservée. Finalement, en raison de la faible incidence de la maladie en 2025, des analyses ont été performées soit avec ou sans l'année 2025.

Les analyses de corrélations ont démontré que des corrélations faibles entre le DSI et les divers facteurs agronomiques rapportés (**Figure 4**). Aucune différence entre les corrélations n'a été observé en utilisant le DSI brute ou transformé en résultat binaire selon un DSI de 10 %, 15 % ou 20 %. En conséquence, les ANOVAs ont été performés uniquement sur l'effet des facteurs agronomiques sur le DSI binaire de 20 %. En total, les 17 facteurs agronomiques, incluant le niveau de risque météoroloque, ont été évalués pour leur effet sur le développement de la maladie. Selon les analyses ANOVA, seulement six des 17 facteurs ont eu un effet sur le développement de la sclérotiniose ($P < 0,05$). Ces facteurs étaient la présence d'apothécies lors de la floraison ($P = 0,0082$), l'humidité du sol rapporté lors des stades végétatifs juste avant la floraison ($P = 0,0006$) et pendant la floraison ($P = 0,0002$), le pourcentage de matière organique du sol ($P = 0,0164$), l'écartement des rangs ($P = 0,0084$), et le risque de développement des apothécies pendant la floraison selon les modèles prévisionnels ($P = 0,0006$). Selon les analyses de corrélation et ANOVA, les autres facteurs n'avaient pas d'effet sur le DSI. Pour les facteurs d'humidité du sol, plus le sol était humide, plus le risque de développement de la maladie (**Annexe 4**). Pour les modèles prévisionnels des apothécies, il y avait une plus

forte pression de maladie lorsque le niveau de risque était plus élevé. Les rangs espacés de 76 cm présentent un risque moindre de développement de la maladie, tandis que les rangs doubles sont les plus vulnérables aux fortes infestations. Pour la matière organique, un taux élevé dans les champs avait tendance à favoriser le développement de la maladie.

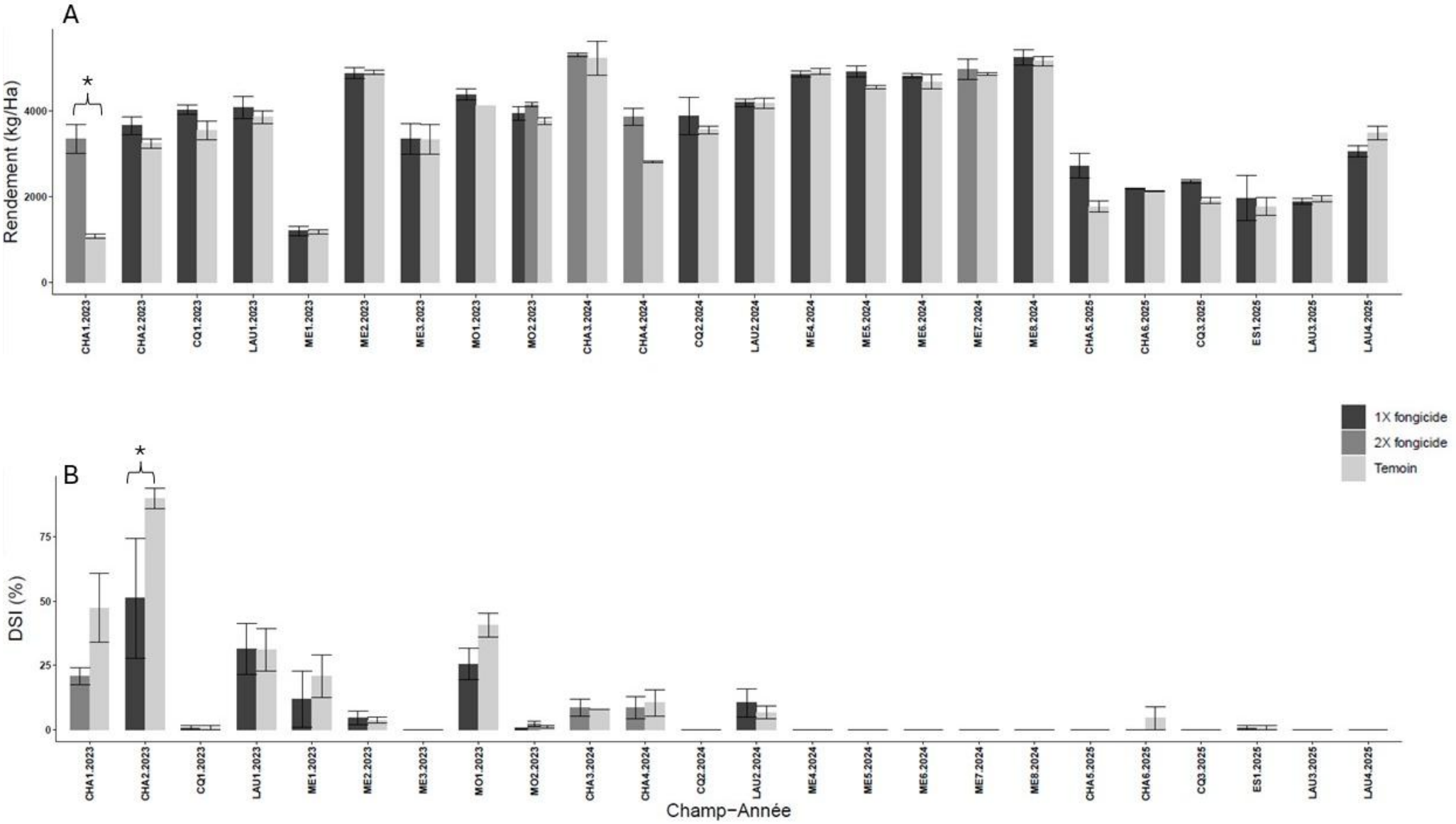


Figure 3. Effet des applications de fongicides sur le rendement (A) et l'indice de sévérité de la sclérotiniose (DSI) (B). * différence significative ($P < 0,05$). CHA, Chaudière-Appalaches; CN, Capitale-Nationale; CQ, Centre-du-Québec; ES, Estrie; LAU, Laurentides; ME, Montérégie-Est; MO, Montérégie-Ouest.

Tableau 1. Rentabilité des applications de fongicides chez les producteurs

Année	Champ	DSI témoin	DSI fongicide 1x	DSI fongicide 2x	Rendement témoin (kg/Ha)	Rendement fongicide 1x (kg/Ha)	Rendement fongicide 2x (kg/Ha)	Produit	Stade	prix OGM Gains (pertes) économiques avec 1 traitement ($/Ha)	prix non-OGM Gains (pertes) avec 1 traitement ($/Ha)	prix OGM Gains (pertes) avec 2 traitements ($/Ha)	prix non-OGM Gains (pertes) avec 2 traitements ($/Ha)
2023	MO1	40,7	25,6		4117	4373		Miravis Neo	V7	88,78 $	107,22 $		
2023	ME2	3,67	4,67		4889	4872		Cotegra	R2	(93,23) $	(94,46) $		
2023	CQ1	0,7	0,7		3496	4076		Cotegra	R2	317,32 $	359,08 $		
2023	CHA1	90		51,1	2210		3340	Cotegra/Acapela	R1 et R2,5			642,12 $	723,48 $
2023	ME1	20,7	11,8		1182	1200		Acapela	R2	(63,08) $	(61,78) $		
2023	LAU1	31,1	31,5		3850	4080		Priaxor	R2	82,99 $	99,55 $		
2023	CHA2	47	20,7		3237	3656,5		Stategro Pro	R3	220,36 $	250,57 $		
2023	MO2*	1,1	0,33		3753	3935		Stategro Pro	R3	56,73 $	69,83 $		
2023	MO2*	1,1		2,2	3753		4141	Delaro Complete/Stategro Pro	R1+R3			132,81 $	160,75 $
2023	ME3	0	0		3333	3351		Cotegra	R3	(69,12) $	(67,82) $		
2024	ME4	0,0	0,0		4900	4850		Delaro Complet	R2	(114,99) $	(118,59) $		
2024	LAU2	6,7	10,4		4166	4183		Priaxor	R1	(84,47) $	(83,24) $		
2024	CHA3	7,8		8,51	5215		5291	Strategro Pro/Cotegra	R1 et R3			(89,02) $	(83,54) $
2024	CHA4	10,4		8,51	2178		2987	Delaro Complete/Stratego Pro	R1 et R3			417,66 $	475,91 $
2024	CQ2	0,0	0,0		3551	3880		Cotegra	R3	150,06 $	173,74 $		
2024	ME6	0,0		0,0	4845		4964	Delaro Complet/Cotegra	R1 et R3			(67,87) $	(59,30) $
2024	ME7	0,0	0,0		5155	5238		Cotegra	R3	(19,44) $	(13,46) $		
2024	ME5	0,0	0,0		4676	4807		Cotegra	R2	13,63 $	23,07 $		
2024	ME9	0,0	0,0		4950	4909		Viatude	R2	(118,23) $	(121,18) $		
2025	ES1	0,7	0,7		1769	1970		Delaro complete	R2	57,95 $	72,42 $		
2025	CHA6	4,4	0,0		2131	2191		Stratego Pro	R2	(38,80) $	(34,48) $		
2025	LAU3	0,0	0,0		1953	1887		Priaxor	R2	(141,65) $	(146,41) $		
2025	LAU4	0,0	0,0		3481	3056		Cotegra	R3	(369,45) $	(400,05) $		
2025	CHA5	0,0	0,0		1746	2638		Cotegra	R2	577,93 $	646,33 $		
2025	CQ3	0,0	0,0		1907	2348		Cotegra	R4	227,22 $	258,98 $		

Les DSI en rouge démontrent des DSI excédent le seuil économique des É.-U. (20 % à 22 %), tandis que les DSI en orange sont à la limite du seuil économique, et les DSI en noir sont en dessous du seuil économique. Les sites ont reçu soit une application de fongicide foliaire, deux applications de fongicides foliaires ou aucune application. Les gains économiques ont été établis selon le type de soya en date des calculs, soit 689 $ par tonne de soya OGM et 761 $ pour du soya conventionnel, les coûts moyens de fongicides selon le guide CRAAQ de 2024, et le coût

moyen de pulvérisation selon le guide du CRAAQ 2022, soit 14,51 $/Ha. CHA, Chaudière-Appalaches; CQ, Centre-du-Québec; ES, Estrie; LAU, Laurentides; ME, Montérégie-Est; MO, Montérégie-Ouest.

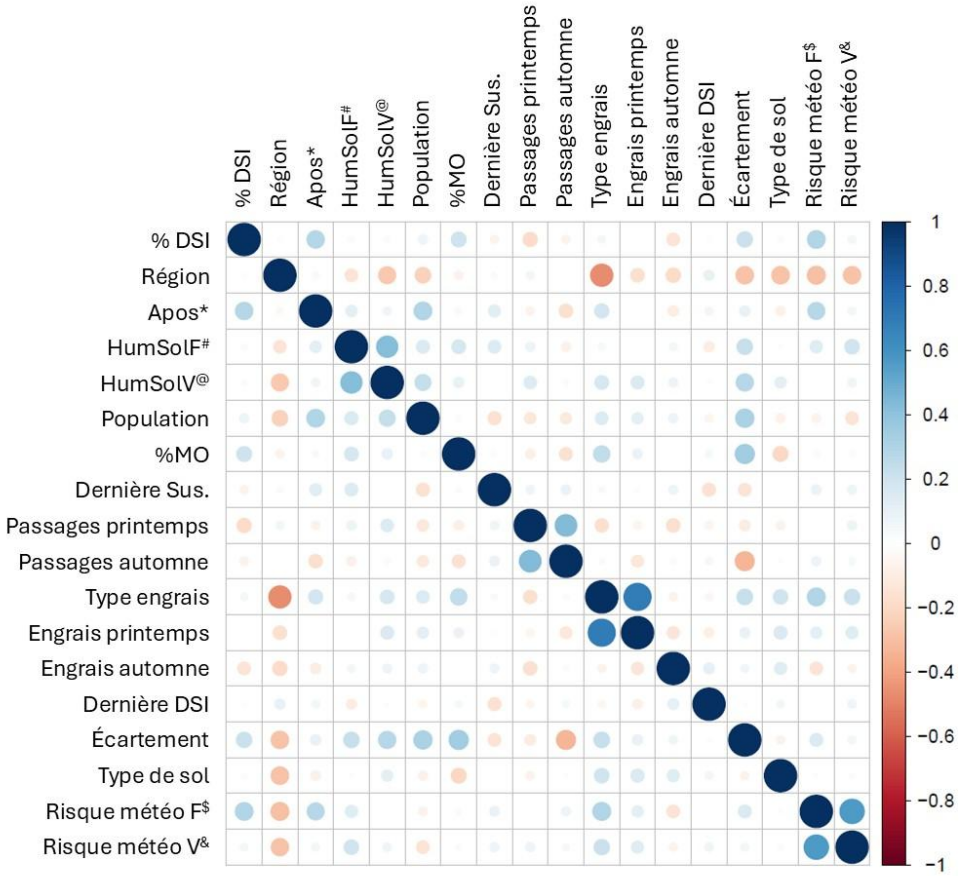


Figure 4. Corrélations entre les différents facteurs agronomiques et le % DSI. La région représente la région agricole. *Présence d'apothécies pendant un stade de floraison (R1 à R3); #, l'humidité du sol relatif (humide, semi-humide, sec) rapporté lors de la floraison; @ l'humidité du sol relatif rapporté lors des stades végétatifs juste avant la floraison; la population de plantes par hectare; %MO, le pourcentage de matière organique du sol; Dernière Sus., nombre d'années depuis la dernière culture susceptible; Passages printemps et automne, le nombre de passages pour le travail du sol au printemps et à l'automne, respectivement; le type d'engrais (chimique, fumier, lisier et leur provenance, soit porc, vache ou poulet); Engrais printemps ou automne, le nombre d'applications d'engrais au printemps et à l'automne, respectivement; Dernière DSI, la sévérité de la sclérotiniose la dernière fois que la maladie a été observée au champ; Écartement, l'écartement de rangs; Type de sol, le type de sol du champ; $Risque météo F, le risque de développement d'apothécies lors des stades de floraison selon les modèles prévisionnels développés au CÉROM; &Risque météo V, le risque de développement d'apothécies lors des stades végétatifs juste avant la floraison selon les modèles prévisionnels développés au CÉROM.

Afin de déterminer si des modèles d'apprentissage pourraient identifier des interactions complexes entre les différents facteurs évalués, des analyses par BRT et FR ont été effectués. En raison de la petite taille de la base de données (n = 149), les analyses par RF n'ont pas été concluant avec des aires sous la courbe (AUC) de 0,5, suggérant que ce modèle n'était pas approprié pour la base de données. Au niveau des BRT, le meilleur modèle étaient développé en utilisant toutes les données (17 facteurs), un DSI de 15 % comme seuil de présence de la maladie et une division de 80 % / 20 % pour le développement et la validation du modèle (**Tableau 2**). Autant que l'AUC était promettant avec une valeur de 0,872, le nombre de vrais positifs était très faible (0,2). Malgré la faible performance des modèles BRT, les modèles ont permis d'identifier d'autres facteurs pouvant avoir un effet potentiel sur la sclérotiniose en évaluant les patrons complexes entre les variables d'intérêt (**Figure 5**). Par exemple, les modèles suggèrent que le type de sol explique jusqu'à 10 % de la variabilité, particulièrement en années favorisant la maladie (2023 et 2024). Également, les BRT ont permis d'identifier le type d'engrais comme facteur important pour le développement de la sclérotiniose, expliquant souvent de 10 % à 15 % de la variabilité. En fait, autant que les BRT sont considérés comme efficace pour le développement de modèles avec de petites bases de données, tous les modèles évalués avaient de faibles performances, suggérant que plus de données (sites) sont nécessaires pour le développement d'un modèle robuste et fiable. Le faible taux de positifs pendant les saisons (14 % avec un DSI de 20 % ou plus, ou 18 % avec un DSI de 10 % ou plus) pourrait aussi expliquer la faible performance des modèles.

Tableau 2. Résultats de BRT selon différents seuils de DSI

BRT avec les saisons 2023 à 2025

	DSI10			DSI15			DSI20		
Modèle	**70/30**	**75/25**	**80/20**	**70/30**	**75/25**	**80/20**	**70/30**	**75/25**	**80/20**
AUC	0,6024	0,8048	0,7986	0,6541	0,737	0,872	0,5943	0,55	0,6106
Exactitude	0,7954	0,8378	0,8333	0,8667	0,8684	0,8667	0,9091	0,9189	0,9
TPR*	0,125	0,1428	0,1667	0,1249	0,1667	0,2	0,3333	0,4	0,25
FPR#	0,0556	0	0	0	0	0	0	0	0

BRT avec les saisons 2023 et 2024

	DSI10			DSI15			DSI20		
Modèle	**70/30**	**75/25**	**80/20**	**70/30**	**75/25**	**80/20**	**70/30**	**75/25**	**80/20**
AUC	0,4701	0,5301	0,6736	0,4464	0,6208	0,784	0,6567	0,7714	0,5962
Exactitude	0,7419	0,7308	0,8	0,7742	0,7692	0,8667	0,8064	0,8846	0,8333
TPR	0,125	0,2222	0	0,125	0,25	0,2	0,1428	0	0
FPR	0,0435	0	0,04	0,04	0	0	0	0,0476	0,0385

*TPR, taux de vrais positifs (*True positive rate*)

#FPR, taux de faux positifs (*False positive rate*)

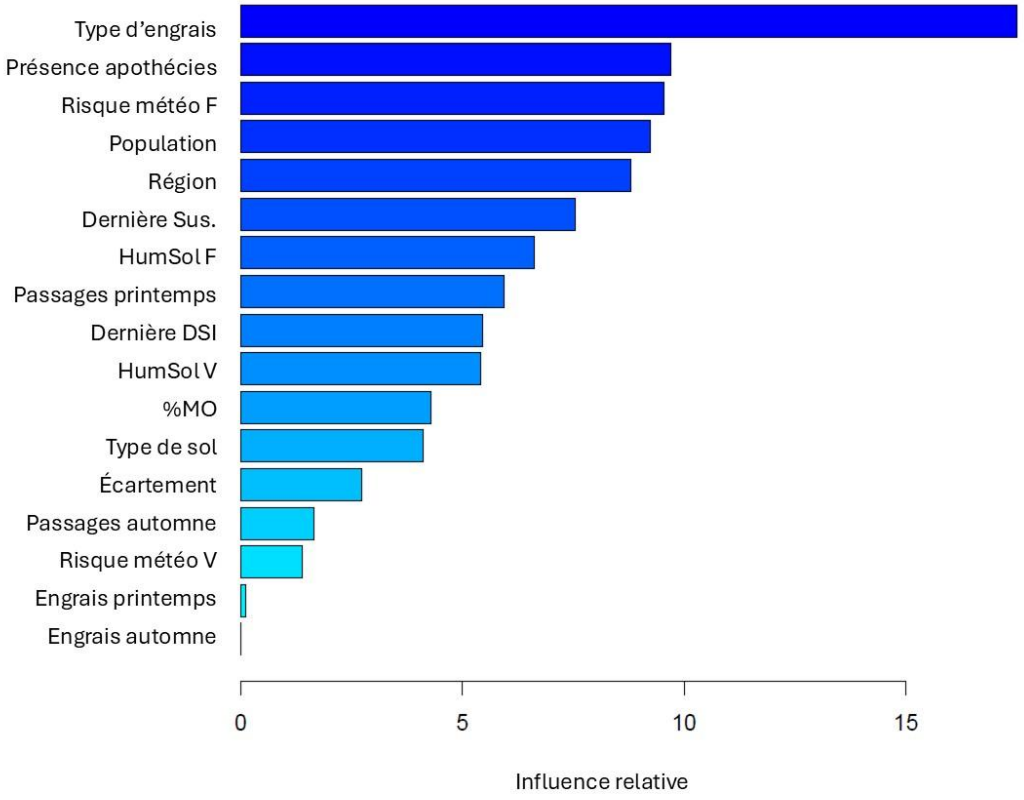


Figure 5. Influence relative des facteurs agronomiques selon le modèle BRT le plus performant, soit un DSI de 15 % avec un taux d'apprentissage de 80 %. La région représente la région agricole. *Présence d'apothécies pendant un stade de floraison (R1 à R3); #, l'humidité du sol relatif (humide, semi-humide, sec) rapporté lors de la floraison; @ l'humidité du sol relatif rapporté lors des stades végétatifs juste avant la floraison; la population de plantes par hectare; %MO, le pourcentage de matière organique du sol; Dernière Sus., nombre d'années depuis la dernière culture susceptible; Passages printemps et automne, le nombre de passages pour le travail du sol au printemps et à l'automne, respectivement; le type d'engrais (chimique, fumier, lisier et leur provenance, soit porc, vache ou poulet); Engrais printemps et automne, le nombre d'applications d'engrais au printemps et à l'automne, respectivement; Dernière DSI, la sévérité de la sclérotiniose la dernière fois que la maladie a été observée au champ; Écartement, l'écartement de rangs; Type de sol, le type de sol du champ; $Risque météo F, le risque de développement d'apothécies lors des stades de floraison selon les modèles prévisionnels développés au CÉROM; &Risque météo V, le risque de développement d'apothécies lors des stades végétatifs juste avant la floraison selon les modèles prévisionnels développés au CÉROM.

Pour les trois saisons, une version bêta d'un outil d'aide à la décision a été rendu accessible aux participants du projet (exemple en **Annexe 1**). L'outil a été développé sous la forme d'un fichier Excel et attribuait un poids à certains facteurs agronomiques examinés dans le cadre de cette étude. Le poids associé à chaque facteur a été déterminé selon nos connaissances et selon la littérature scientifique pour la saison 2023, et selon les observations de cette étude pour les saisons 2024 et 2025. L'outil d'aide à la décision avait la meilleure performance (modèle 2) n'avait qu'une performance modérée, avec une exactitude de 61,4 %, un taux de vrais positifs de 88,2 % et un taux de faux positifs de 42,2 % (**Tableau 3**)**.** Cette version de l'outil d'aide à la décision avait tendance à surestimer le nombre de sites à risque et ferait en sorte que 42 % des champs nécessitant pas de fongicide foliaire en raison d'un faible niveau de maladie recevront potentiellement des applications en raison d'une indication à risque. La surestimation de champs à risque était élevée en saison pluvieuse (2023 et 2024) avec 33 des 54 (62 %) cas provenant de l'année 2023 (une année marquée par un excès de pluie), 14 des 54 cas (26 %) provenant de la saison 2024, et seulement 7 des 54 cas (13 %) provenant de la saison 2025 (année de sécheresse). Des modifications seront apportées à l'outil afin de bien réfléchir les résultats des analyses statiques. L'outil final sera mis en disposition aux producteurs et agronomes à travers le site web du CÉROM. Afin de continuer à améliorer l'outil d'aide à la décision, le Réseau d'avertissement phytosanitaire (RAP) en Grandes cultures continuera à accueillir des données en collaboration avec le dépistage d'apothécies.

Tableau 3. Performance des différentes versions de l'outil d'aide à la décision pour la sclérotiniose du soya

	Seuil DSI	Exactitude	Précision	Spécificité	TPR*	TNR#
Modèle 1	10	0,641	0,304	0,600	0,840	0,400
Modèle 2	20	0,614	0,217	0,578	0,882	0,422
Modèle 3	10	0,683	0,333	0,650	0,840	0,350
Modèle 4	20	0,655	0,238	0,625	0,882	0,375
Modèle 5	10	0,703	0,339	0,692	0,760	0,308
Modèle 6	20	0,676	0,232	0,664	0,765	0,336

*TPR, taux de vrais positifs (*True positive rate*)

#TNR, taux de vrais négatifs (*True negative rate*)

DIFFUSION DES RÉSULTATS

Les résultats seront diffusés au moyen d'une fiche synthèse partagée sur le site web du CÉROM et d'Agri-Réseau. Les résultats préliminaires ont été discutés lors de la réunion annuelle du RAP-Grandes cultures, groupe de travail maladies qui a eu lieu le 19 février 2026.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Les résultats de cette étude ont permis d'identifier certains facteurs ayant une influence importante sur le développement de la sclérotiniose du soya au Québec. Autant que les modèles développés avaient de faibles taux de réussite, l'étude a permis de mieux comprendre les facteurs agronomiques ayant une influence sur le développement de la maladie. Effectivement, les résultats ont démontré que l'écartement de rangs avait un effet important sur la maladie, suggérant qu'un plus grand écartement de rangs peut aider à réduire le développement de la maladie. Le type d'engrais utilisé a aussi été identifié comme facteur affectant le développement de la maladie selon les modèles BRT. Les résultats ont aussi permis de démontrer que les facteurs climatiques et l'humidité du sol juste avant la floraison et pendant la floraison sont parmi les facteurs les plus importants pour le développement de la maladie.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Tanya Copley, PhD, chercheuse en phytopathologie
Centre de recherche sur les grains (CÉROM) inc.
740 chemin Trudeau
Saint Mathieu de Beloeil, J3G 0E2
Tel : +1 (450) 464 - 2715 poste 219
Courriel : tanya.copley@cerom.qc.ca

RÉFÉRENCES

1. Mila, A., et al. (2003). Impact of management practices on prevalence of soybean Sclerotinia stem rot in the north-central United States and on farmers' decisions under uncertainty. *Plant disease* **87**(9): p. 1048-1058.

2. Jones, S., et al. (2012). Site-specific risk factors of white mould epidemics in bean (*Phaseolus vulgaris*) in Tasmania, Australia. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* **40**(3): p. 147-159.

3. Hub, C.R. (2018). *Supplementary document for operational models to forecast canola growth stage, Sclerotinia risk, and yield in Western Canada (2013 to 2017)*. Disponible sur: https://www.canolacouncil.org/wp-content/uploads/2020/12/Operational-models-to-forecast-canola-growth-stage-sclerotinia-risk-and-yield-supplemental-report.pdf.

4. Fall, ML, et al. (2018). Case study of an epidemiological approach dissecting historical soybean sclerotinia stem rot observations and identifying environmental predictors of epidemics and yield loss. *Phytopathology* 108:469-478

5. Willbur, J.F., et al. (2019). Meta-analytic and economic approaches for evaluation of pesticide impact on sclerotinia stem rot control and soybean yield in the North Central United States. *Phytopathology* **109**(7): p. 1157-1170.

6. Radzikowska, D., et al. (2020). Influence of SDHI seed treatment on the physiological conditions of spring barley seedlings under drought conditions. *Agronomy* 10:731

7. Sulewska, H., et al. (2019). Can pyraclostrobin and epoxiconazole protect conventional and stay-green maize varieties grown under drought stress? *PLoS One* 14:e0221116

ANNEXES

Annexe 1. Exemple de feuille de notation, d'informations agronomiques recueillies et l'outil d'aide à la décision (fichier Excel « Annexe 1 »)

Annexe 2. Nombre de champs suivis par région

Région	Nb. champs		
	2023	**2024**	**2025**
CHA	11	12	10
CN	3	3	1
CQ	2	3	2
ES	4	5	3
LAU	4	5	5
ME	12	15	15
MO	8	9	8
OU	1	2	2
SLSJ	2	1	0
Total	**47**	**56**	**46**

CHA, Chaudière-Appalaches; CN, Capitale-Nationale; CQ, Centre-du-Québec; ES, Estrie; LAU, Laurentides; ME, Montérégie-Est; MO, Montérégie-Ouest; OU, Outaouais; SLSJ, Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Annexe 3. Catégories pour les facteurs agronomiques pour l'évaluation de l'importance des facteurs selon la méthode d'arbre de régression à gradient amélioré

Pratique agricole	Catégories
DSI*	0, 0 à < 20 1, 20 +
Population (plantes par hectare)	0, < 300,000 1, <350,000 2, <400,000 3, <450,000 4, > 450,000
% matière organique du sol	0, < 3 % 1, 3 % à 4 % 2, 4 % à 6 % 3, ≥ 6%
Années depuis la dernière culture susceptible	0, 1 an 1, 2 ans 2, 3 ans 3, 4 ans 4, 5 ans 5, 6 ans ou plus
Travail du sol	0, Travail conventionnel 1, Semis-direct depuis 6 ans ou plus 2, Semis-direct depuis 1 à 5 ans 3, Travail réduit
Travail du sol simplifié	0, Travail conventionnel 1, Semis-direct 3, Travail réduit
Nb. de passages pour le travail du sol au printemps	0, Aucun travail de sol au printemps 1, 1 passage 2, 2 passages, 3, 3 à 6 passages
Nb. de passages pour le travail du sol à l'automne (avant l'année en soya)	0, Aucun travail de sol à l'automne 1, 1 passage 2, 2 passages ou plus
Type d'engrais en année soya	0, Aucun engrais 1, Engrais chimique 2, Fumier 3, Lisier
Nb. d'applications d'engrais en année soya	0, Aucune application 1, une application 2, deux applications ou plus
Type de sol	1, Argile 2, Loam argileux 3, Loam, loam limoneux ou loam limoneux argileux 4, Loam sablonneux

	5, Sable ou sable limoneux
Sévérité de la maladie la dernière fois en soya	0, Aucune maladie ou DSI < 10 1, DSI modéré (10 % à < 20 %) ou ne sais pas 2, DSI sévère (20 % ou plus)
Écartement des rangs	0, 76 cm (30 pouces) 1, 50 à 56 cm (20 à 22 pouces) 2, 38 cm (15 pouces) 3, 18 cm (7 pouces) 4, rangs doubles (18 et 38 à 50 cm; 7 et 15 à 20 pouces)
Humidité du sol (5 cm) rapportée juste avant la floraison (stades V5 à V8)[#]	0, Sec 1, Semi-humide 2, Humide
Humidité du sol (5 cm) rapportée pendant la floraison (stades R1 à R3)[#]	0, Sec 1, Semi-humide 2, Humide
Niveau de risque selon les modèles prévisionnels de l'apparition des apothécies juste avant la floraison (stades V5 à V8)[&]	0, Faible risque 1, Risque modéré 2, Risque élevé
Niveau de risque selon les modèles prévisionnels de l'apparition des apothécies pendant la floraison (stades R1 à R3)[&]	0, Faible risque 1, Risque modéré 2, Risque élevé

*Plusieurs seuils de DSI ont été évalués, soit présence à 20 % et plus, 15 % et plus ou 10 % et plus

[#] Un sol était considéré comme sec si aucune humidité n'était visible, semi-humide si le sol avait de l'humidité mais ne se collait pas lorsque serré dans la main, ou humide si le sol était humide et se collait dans un tas lorsque serré dans la main ou était saturé. L'humidité du sol était évaluée dans les 5 cm du sol.

[&] Un faible risque est considéré lorsque les modèles prévisionnels indiquent un risque de moins de 0,15; modéré un risque de 0,15 à 0,2; élevé > 0,2.

Annexe 4. Effet des facteurs évalués sur le DSI au champ

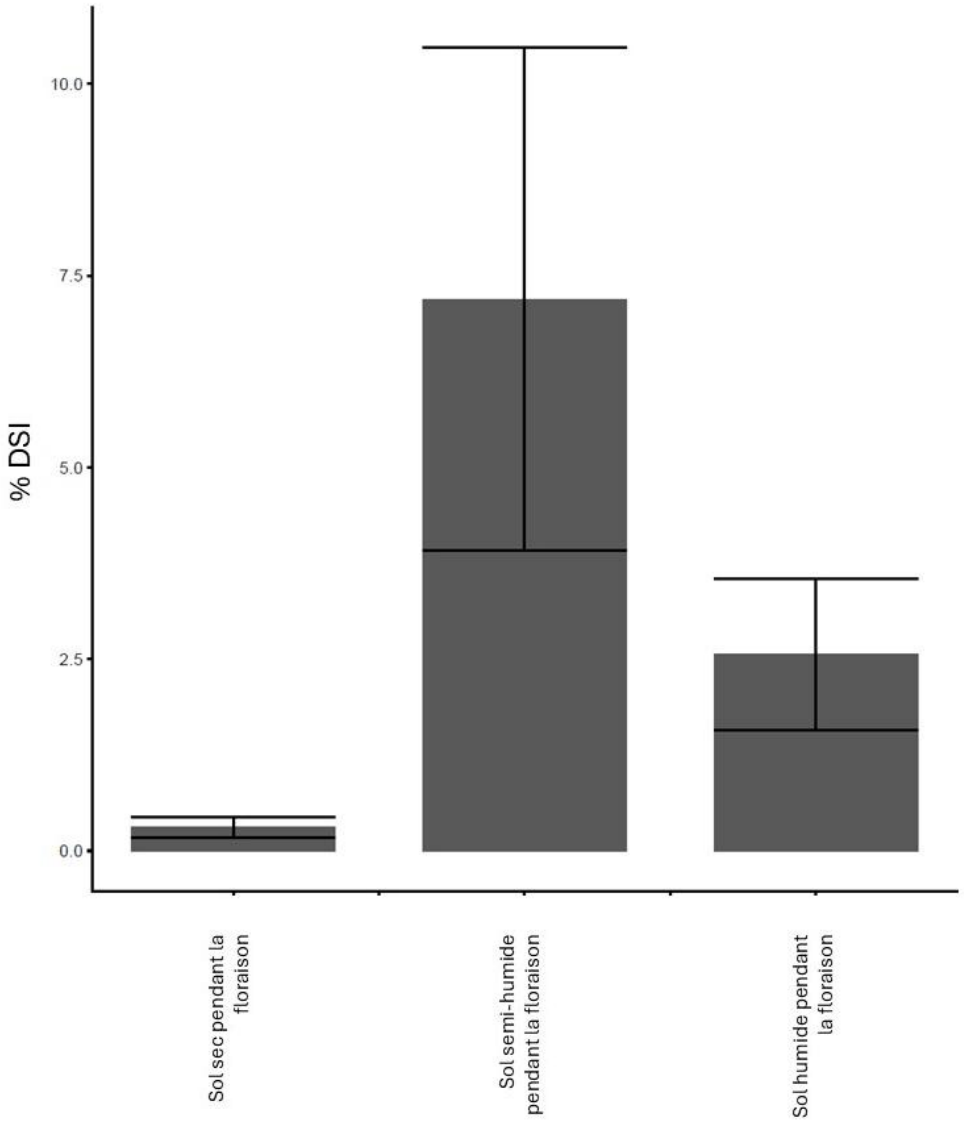


Figure S4.1 L'effet de l'humidité du sol rapportée dans les 5 premières centimètres du sol lors des stades de floraison (R1 à R3) sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

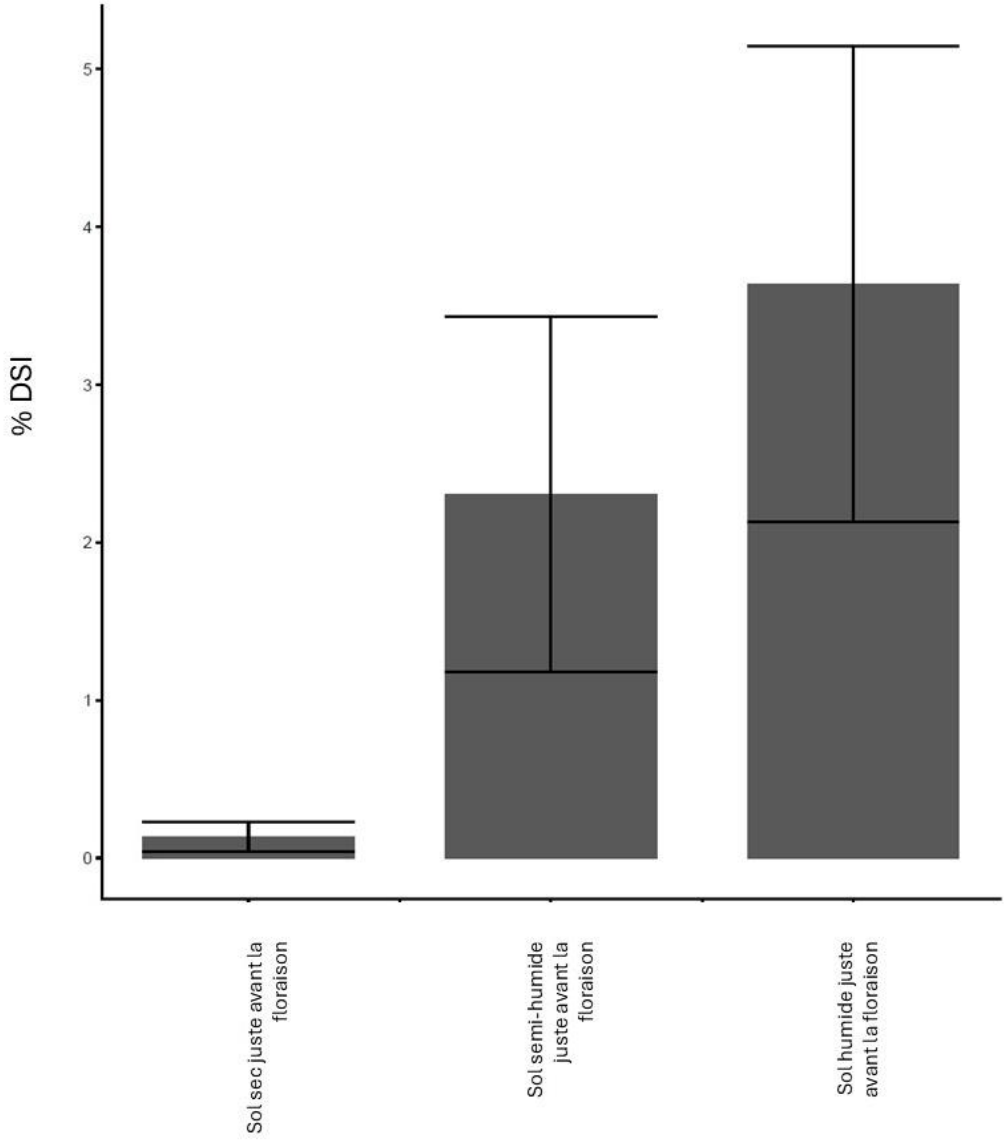


Figure S4.2 L'effet de l'humidité du sol rapportée dans les 5 premières centimètres du sol lors des végétatifs juste avant la floraison (V5 à V8) sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

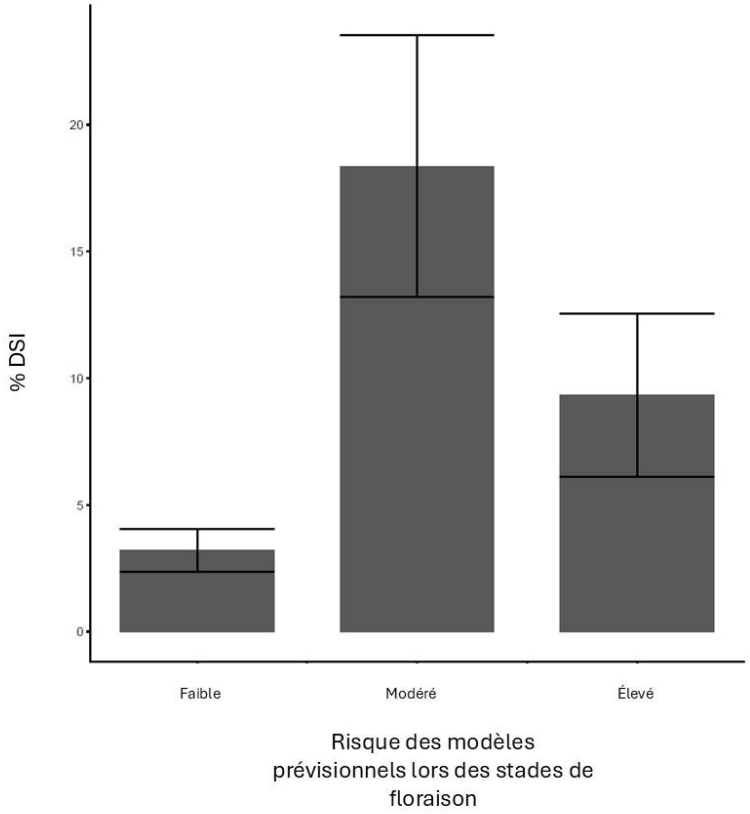


Figure S4.3 L'effet des prédictions de modèles prévisionnels de l'apparition des apothécies lors des stades de floraison (R1 à R3) sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

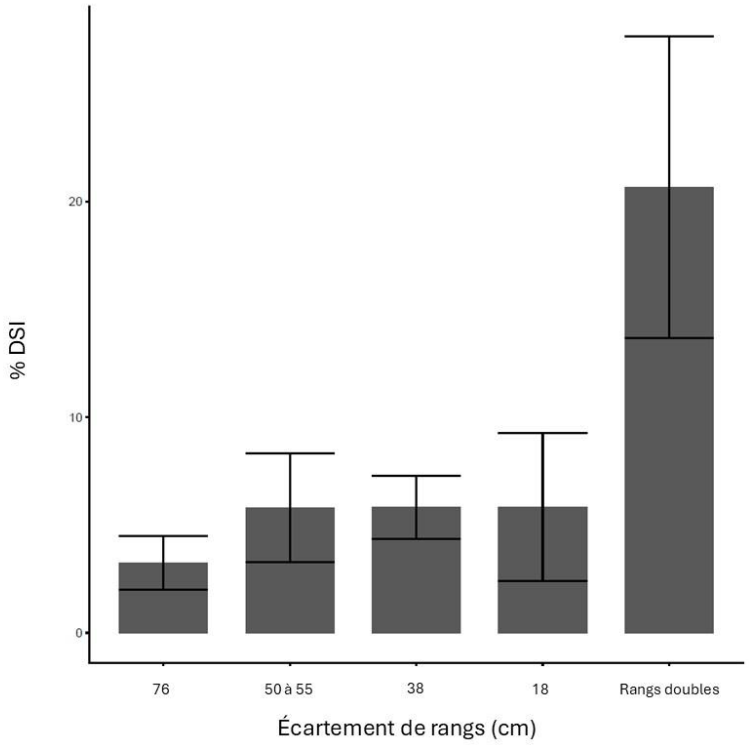


Figure S4.4 L'effet de l'écartement des rangs sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

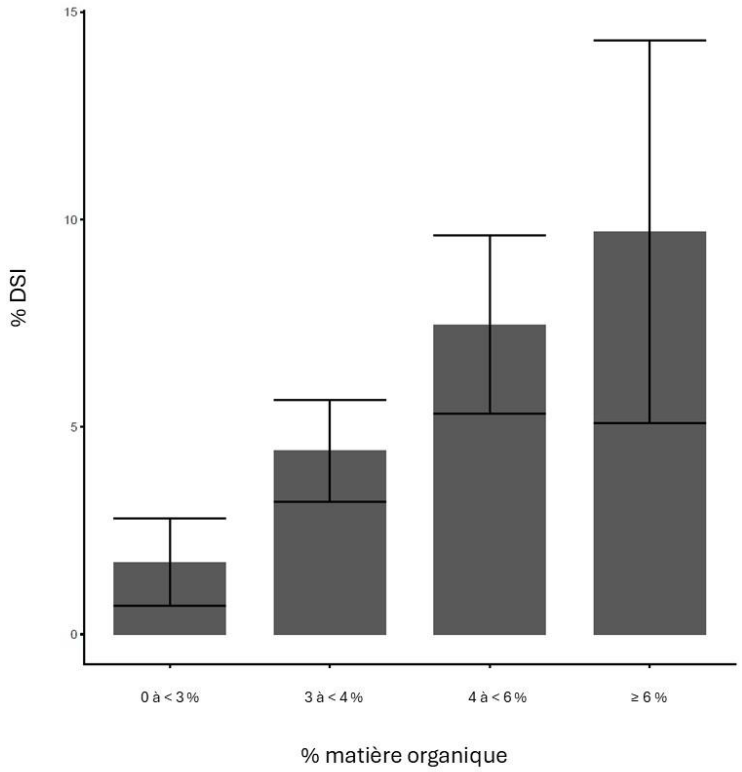


Figure S4.5 L'effet du taux de la matière organique du sol sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

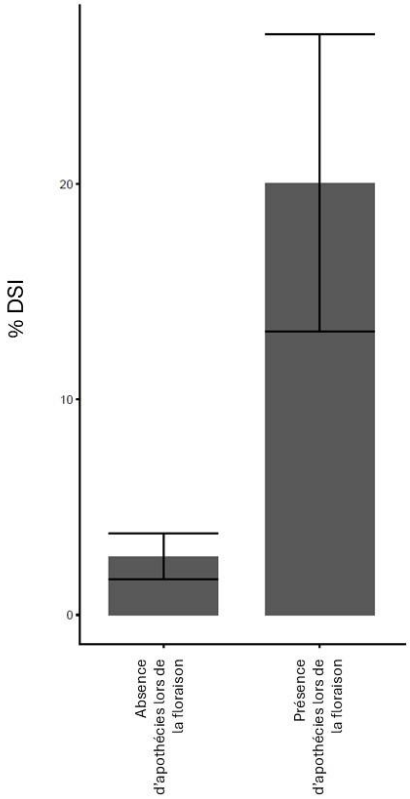


Figure S4.6 L'effet de la présence d'apothécies lors des stades de floraison (R1 à R3) sur le % DSI de la sclérotiniose du soya. Des dépôts de sclérotes étaient présents dans 94 des 149 champs au cours des trois ans.

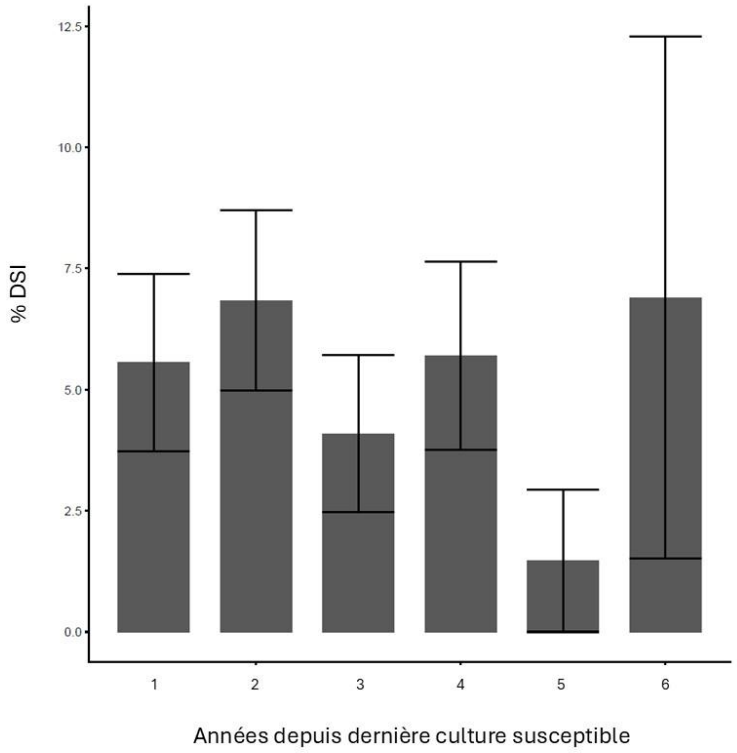


Figure S4.7 L'effet de la durée des rotations sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

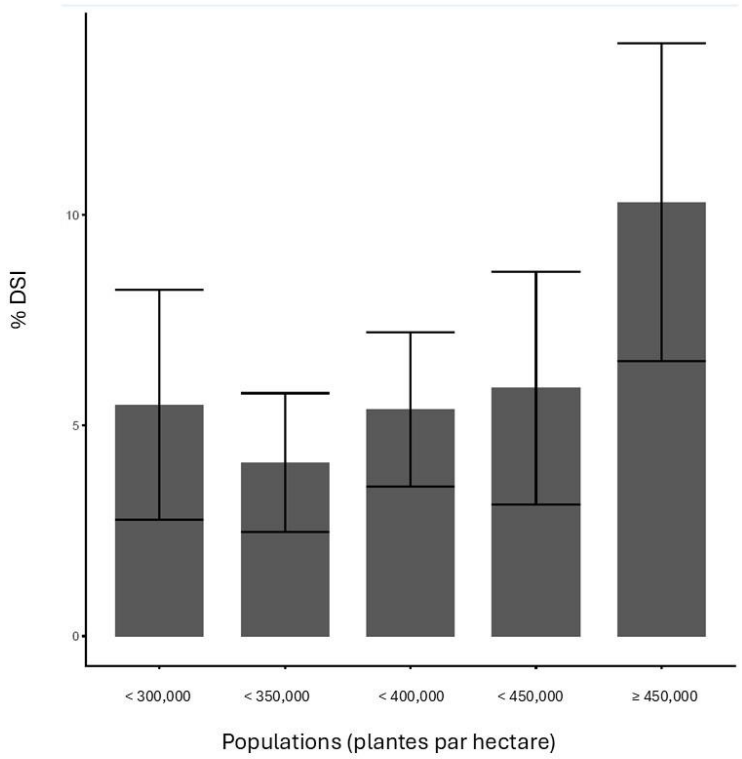


Figure S4.8 L'effet du taux de semis (population) sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

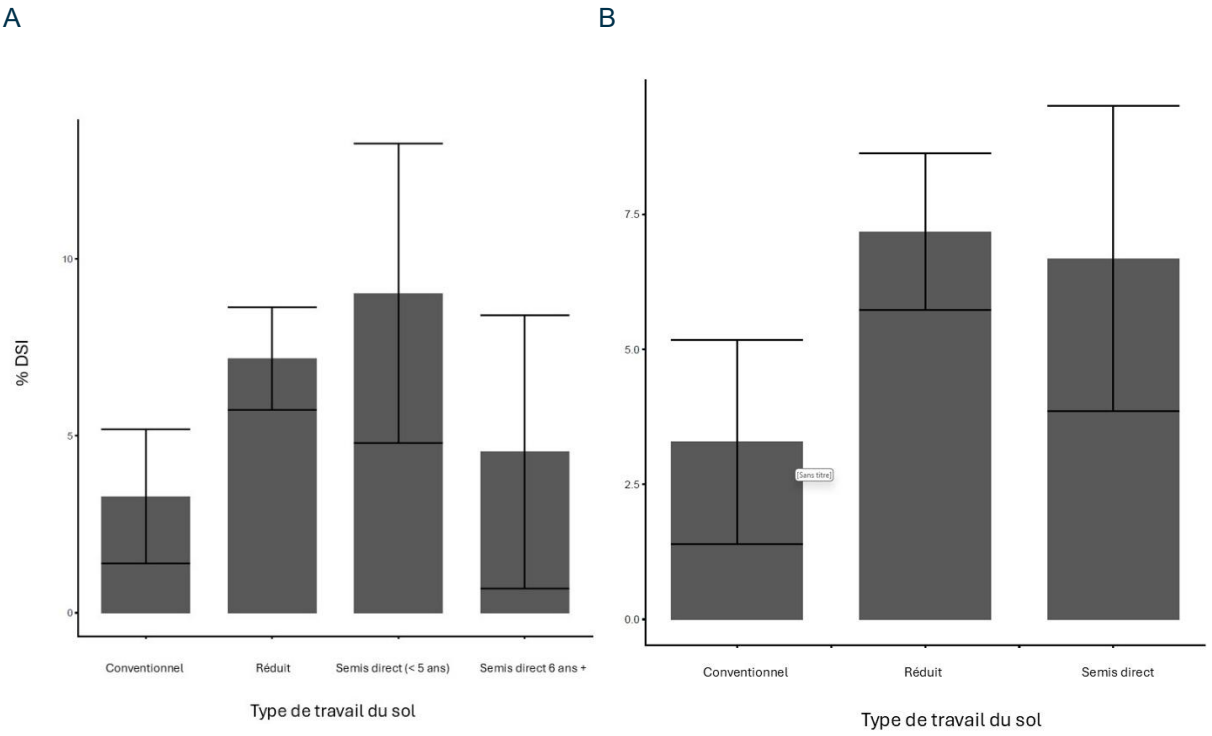


Figure S4.9 L'effet du travail du sol sur le % DSI de la sclérotiniose du soya. A, Le travail du sol avec des précisions concernant le nombre d'années depuis que le champ a été mis en semis direct; B, Le travail du sol avec tous les champs en semis direct mis ensemble.

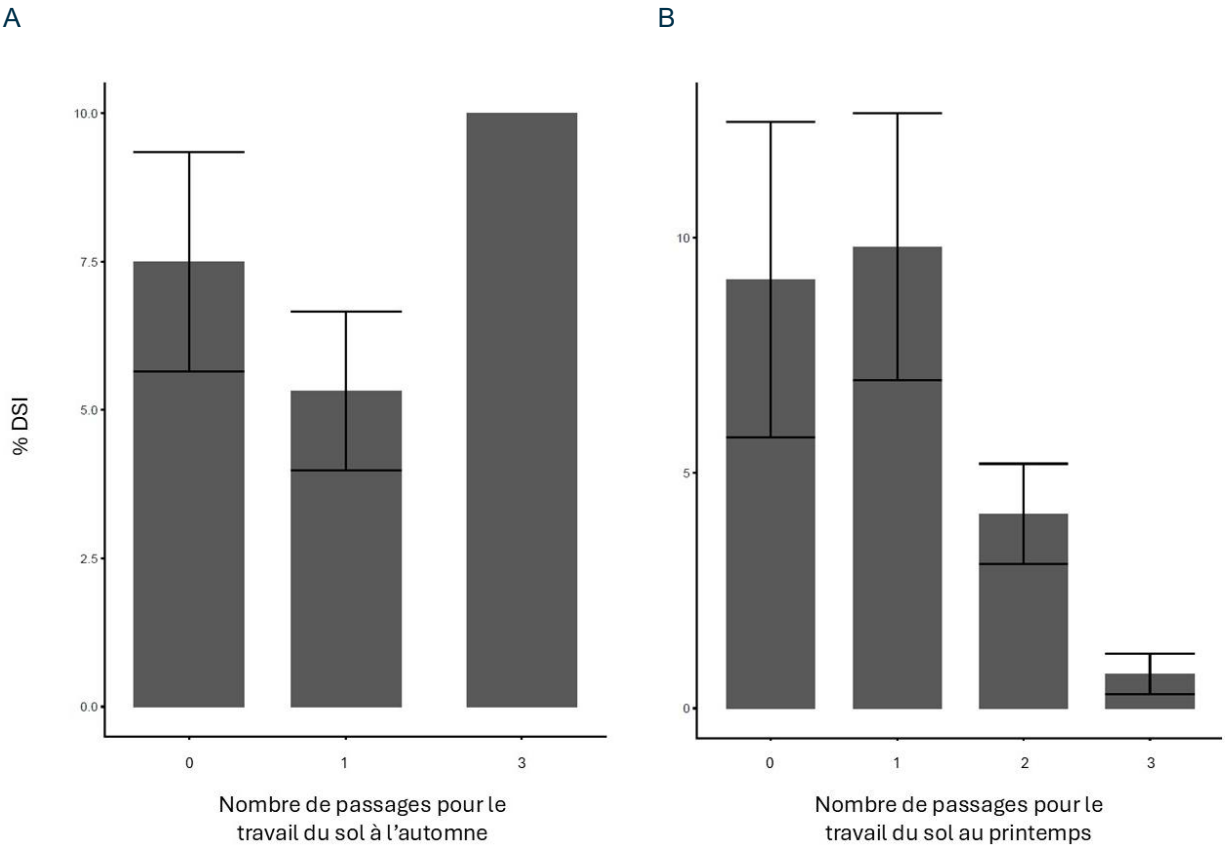


Figure S4.10 L'effet du nombre de passages pour le travail du sol à l'automne (avant le semis du soya) (A) ou au printemps (année en soya) (B) sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

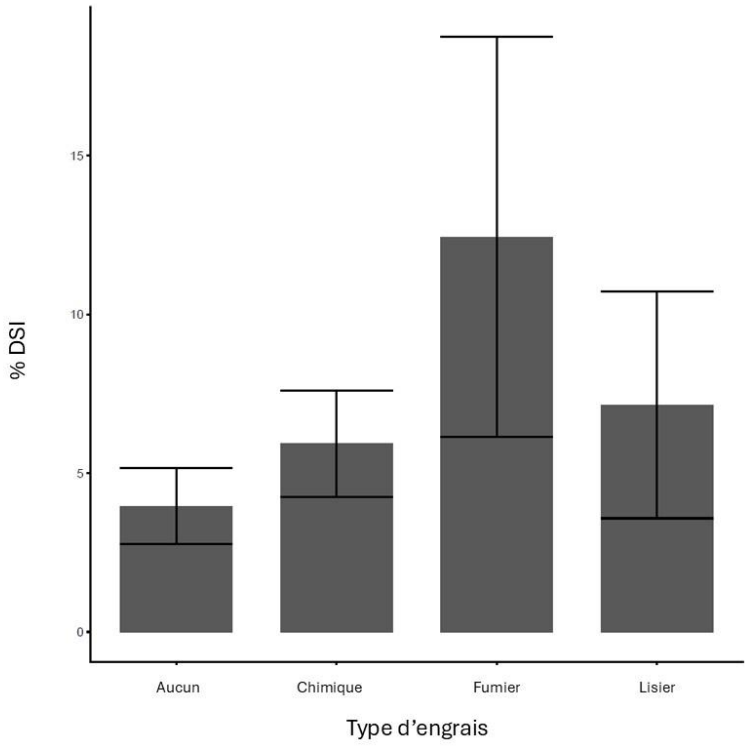


Figure S4.11 L'effet du type d'engrais sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

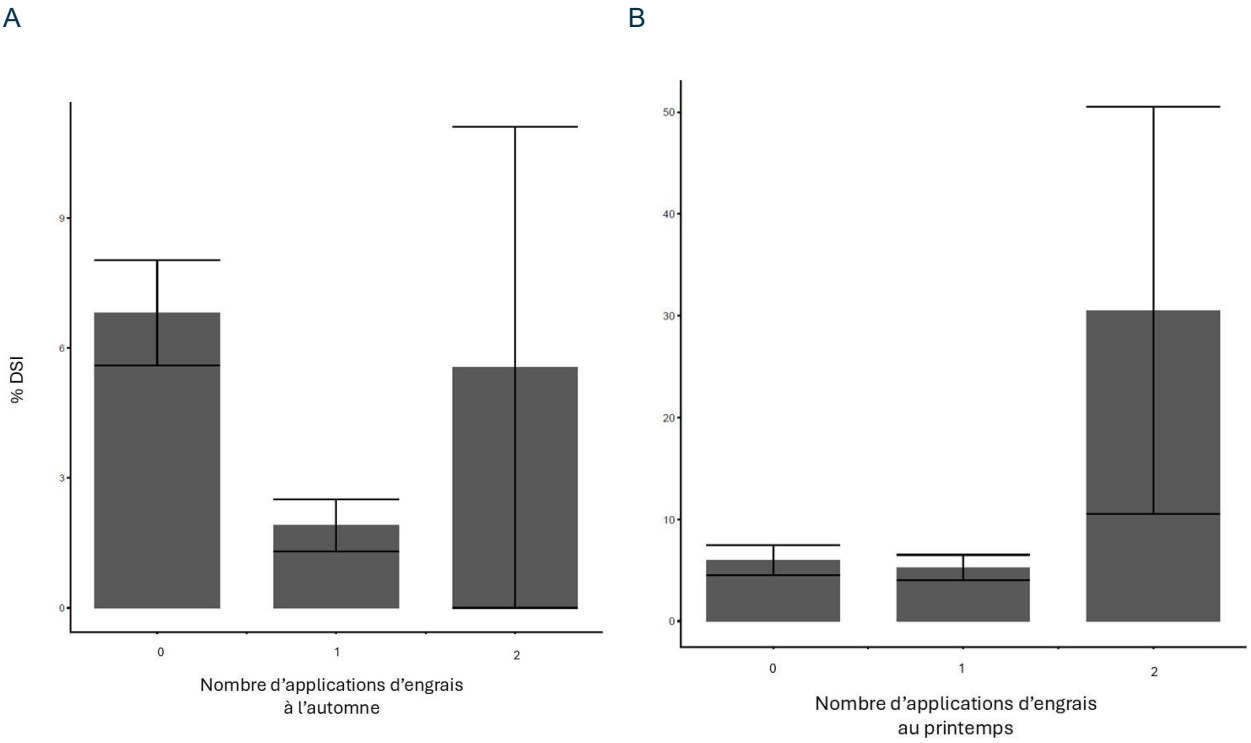


Figure S4.12 L'effet du nombre d'applications d'engrais à l'automne (avant le semis du soya) (A) ou au printemps (année en soya) (B) sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

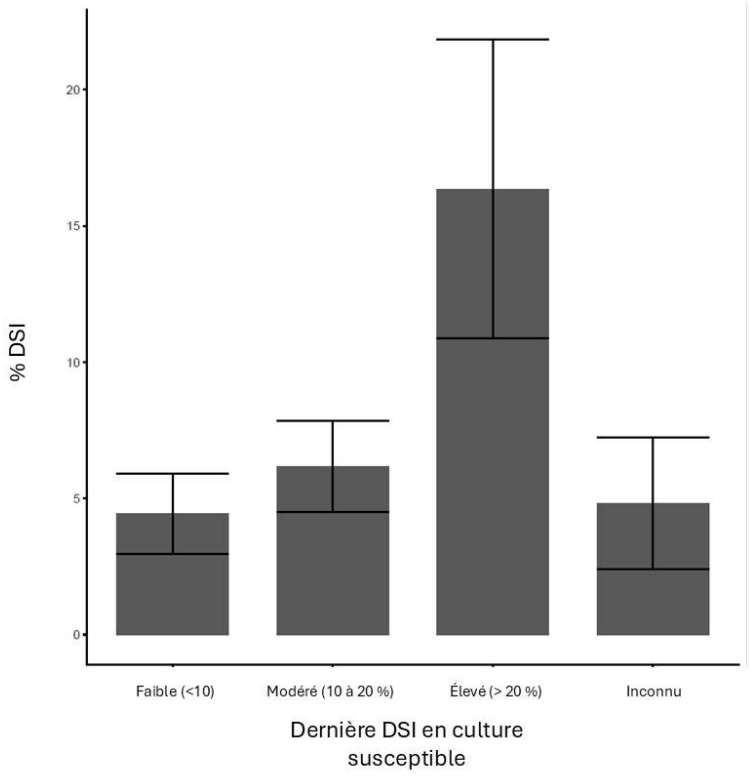


Figure S4.13 L'effet du DSI en dernière culture susceptible avant l'année en cours sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.

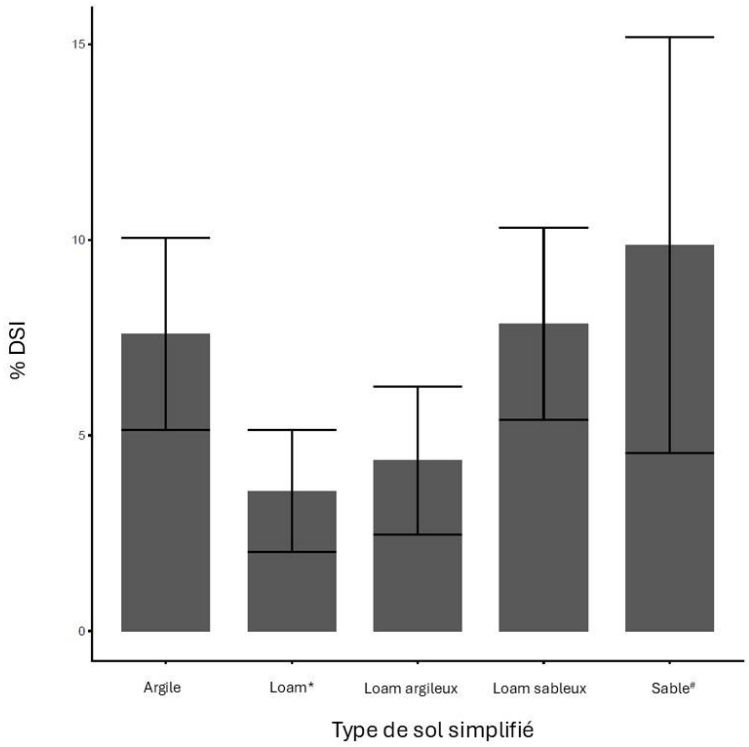


Figure S4.14 L'effet du type de sol sur le % DSI de la sclérotiniose du soya. *La catégorie « Loam » inclut les loams, loam limoneux, loam limoneux argileux et loam limoneux loam. #La catégorie « Sable » inclut les sols sablonneux et les sables limoneux.

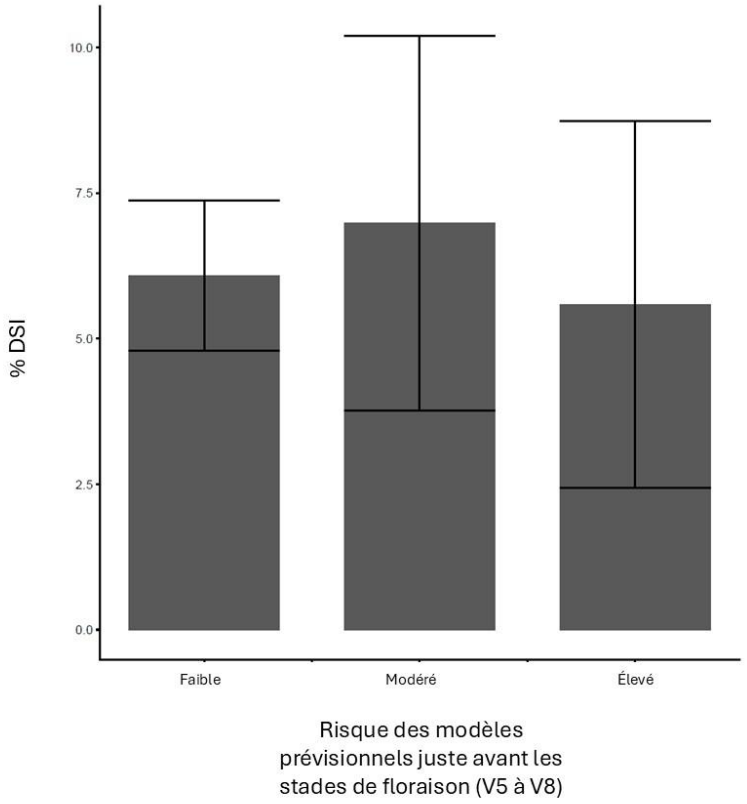


Figure S4.14 L'effet des prédictions de modèles prévisionnels de l'apparition des apothécies lors des stades végétatifs juste avant la floraison (V5 à V8) sur le % DSI de la sclérotiniose du soya.