

**VALIDATION ET IMPLANTATION D'UN MODÈLE PRÉVISIONNEL DE LA FUSARIOSE DE L'ÉPI DES  
CÉRÉALES SUR AGROMÉTÉO**

**CERO-1-16-1761**

DURÉE DU PROJET : AVRIL 2017 / AVRIL 2018

**RAPPORT FINAL**

Réalisé par :  
Yves Dion<sup>1,2</sup>, Gaétan Bourgeois<sup>3</sup>, René Audet<sup>4</sup>, Sylvie Rioux<sup>5</sup>, Claude Parent<sup>6</sup>,  
Elisabeth Vachon<sup>7</sup>

- (1) CÉROM, Saint-Mathieu-de-Beloeil (2016 à Mai 2017) ;
- (2) MAPAQ, Direction régionale de la Montérégie Est, Saint-Hyacinthe (Mai 2017 - 2018)
- (3) Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Saint-Jean-sur-Richelieu, Saint-Jean-sur-Richelieu
- (4) Direction des Sciences et de la technologie, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec
- (5) CÉROM, Complexe scientifique, Québec
- (6) MAPAQ, Direction de l'innovation scientifique et technologique, Québec
- (7) Moulins de Soulanges, Saint-Polycarpe, Québec

27 avril 2018

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.



## **VALIDATION ET IMPLANTATION D'UN MODÈLE PRÉVISIONNEL DE LA FUSARIOSE DE L'ÉPI DES CÉRÉALES SUR AGROMÉTÉO**

### **CERO-1-16-1761**

#### **RÉSUMÉ DU PROJET (Maximum 20 lignes)**

Le projet a utilisé les jeux de données de divers essais expérimentaux et de nouvelles données, recueillies en 2017, pour vérifier la performance du modèle prévisionnel de risque de la fusariose de l'épi des céréales utilisé la dernière saison. Le projet a comparé les performances de plusieurs modèles en vue d'optimiser la prévision du risque. Nous avons identifié, parmi treize modèles, deux modèles qui présentent des résultats adéquats quant à leur performance (exactitude, sensibilité et spécificité) pour la prédiction des risques de la fusariose de l'épi du blé. Ces modèles prennent en compte un indice moyen de risque pour la plage des stades Zadoks 61 à Zadoks 65 pour définir le niveau de risque. Il s'agit d'une approche novatrice, par opposition à l'utilisation d'une date unique correspondant à un stade phénologique spécifique pour évaluer le risque. Cette approche reflète justement la période critique d'infection, laquelle induit les plus forts impacts sur la culture du blé. Cette solution de modélisation bioclimatique est à implanter pour la campagne 2018 dans la plateforme Agrométéo Québec. L'expérience de l'implantation d'un modèle sur Agrométéo Québec en 2017 sera mise à profit pour la nouvelle version proposée par ce projet. Agrométéo Québec offre une solution robuste et automatisée de prévision du risque de la fusariose. D'une part, l'interface d'Agrométéo Québec est connue et appropriée à la diffusion et, d'autre part, l'implantation du modèle prévisionnel dans la structure logicielle et opérationnelle d'Agrométéo Québec permet une intégration logique et aboutie quant à la cueillette et au traitement de l'ensemble des données météorologiques devant mener à une prévision de risque. Une précision améliorée et une interface sous forme de cartes pour le jour courant et à venir contribuent à une meilleure prise de décision quant au recours à des traitements phytosanitaires.

#### **OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE (Maximum 20 lignes)**

##### **Objectif**

Assurer le meilleur transfert possible en ce qui concerne la prévision du risque de la fusariose de l'épi des céréales. Il s'agit de proposer et d'implanter un modèle prévisionnel mis à jour sur Agrométéo Québec. Le projet a mis à l'essai de nouveaux modèles prévisionnels existants ou en développement.

##### **Aperçu de la méthodologie**

Le développement d'un modèle prévisionnel de risque d'une maladie des plantes doit mettre en relation les facteurs de risque et la mesure objective de l'impact de la maladie. Les producteurs agricoles ont un certain contrôle sur des facteurs tels que les pratiques culturales, rotations, choix du cultivar et nos modèles prévisionnels ne les intègrent pas pour le moment, il incombe aux producteurs d'en tenir compte. Les facteurs climatiques sont déterminants quant au risque d'infection et le modèle prévisionnel utilise ces informations pour estimer le risque. Il s'agit donc de mettre en relation les variables climatiques importantes qui modulent la fusariose (précipitations, humidité relative de l'air et températures) avec les stades critiques pour l'infection de la plante et avec des résultats valides quant à l'infection observée.

Deux bases de données intégrant les données phénologiques des cultures et la variable choisie pour caractériser l'impact de l'infection ont été utilisées dans ce projet. La première regroupe des données s'échelonnant de 2007 à 2014. Cette base de données a été utilisée pour développer ou mettre au point différents modèles et pour en évaluer les performances. Une autre base de données a été utilisée sur le principe de l'indépendance du développement d'un modèle et de l'évaluation de sa performance et de sa validation. Cette base de données regroupait des jeux de données de 2016 et de 2017, celles-ci ayant été acquises grâce au financement du projet. Plus de détails aux Annexes 1 et 2.

## **RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS** (Maximum de 3 pages (ajouter des annexes au besoin))

La base de données 2007-2014 regroupait des données des années 2007 à 2012 et 2014. Selon l'année, les sites (et organisations) de Saint-Mathieu-de-Beloeil (CÉROM), Saint-Augustin (Université Laval), L'Acadie et Normandin (Agriculture et Agroalimentaire Canada) et La Pocatière (Centre de développement bioalimentaire du Québec) ont été mis à contribution.

La base de données 2016-2017 regroupait principalement des données de 2017. L'essentiel des données est le fruit de la collaboration des Moulins de Soulanges, qui participait à de nombreux essais à l'interne. Ainsi, huit sites dans Lanaudière-Mauricie, trois sites en Estrie et deux sites en Montérégie ont été mis à contribution. Chaque site comptait plusieurs cultivars et un grand nombre de parcelles. Neuf sites des Réseaux grandes cultures du Québec (RGCC) ont été mis à contribution en 2017, chacun avec trois cultivars de blé. Un site des RGCC a contribué aux données en 2016. Deux participants de clubs agroenvironnementaux (Bas St-Laurent et Outaouais) ont contribué à trois sites chez des producteurs en 2017.

Pour la suite, une discussion plus détaillée et technique des résultats est présentée à l'Annexe 3. Cette annexe a été préparée par l'équipe du Gaétan Bourgeois, Ph.D.. Nous y ferons référence notamment pour les tableaux et figures.

Treize modèles prévisionnels ont été mis à l'essai. Par ordre alphabétique, il s'agit des modèles AAC 2018a, AAC 2018b, CAM 2017, CAM 2018, De Wolf A, De Wolf B, Fusariose, Parent #1, Parent #2, Shah, Shah-QC, US et US-QC.

Les modèles prévisionnels De Wolf A, De Wolf B et CAM 2017 étaient déjà implantés dans le logiciel CIPRA. Le modèle CAM 2017 (acronyme de CÉROM, AAC, MAPAQ) est celui qui a été implanté dans CIPRA et Agrométéo Québec au printemps 2017. Il a été utilisé pour les prévisions des risques de fusariose de l'épi du blé pendant la saison 2017.

De nouveaux modèles ont été implantés dans CIPRA. Deux modèles ont été proposés par Claude Parent (Parent #1 et Parent #2). Ceux-ci ont été élaborés à partir de la première base de données. Un modèle américain (US) a été intégré à CIPRA. Une adaptation du modèle US, nommée subséquentement US-QC et utilisant les mêmes variables météo, a été préparée à partir des jeux de données du Québec recueillies de 2007 à 2014.

Un deuxième modèle américain, celui de Shah, a été ajouté. Encore une fois, une adaptation du modèle Shah, nommée subséquentement Shah-QC et utilisant les mêmes variables météo, a été préparée à partir des jeux de données du Québec recueillies de 2007 à 2014.

Une deuxième version du modèle CAM 2017 a été ajoutée et nommée CAM 2018. Cette nouvelle version visait à corriger quelques problématiques observées au cours de la saison 2017.

Afin d'inclure la période phénologique du blé sensible à l'infection par *Fusarium sp.*, deux modèles additionnels, AAC 2018a et AAC 2018b, ont été élaborés à partir des jeux de données de 2007 à 2014.

Le modèle "Fusariose" a été bâti à l'aide de courbes de réponse à la température et à la mouillure disponible dans le module d'infection générique des maladies des cultures du logiciel CIPRA.

Les variables et paramètres utilisés par les différents modèles sont présentés en Annexes 3 et 4. Les plages d'utilisation des données météorologiques y sont présentées. La Figure 3 de l'Annexe 3 représente le schéma temporel, en fonction des stades de croissance et de développement du blé, d'utilisation des données météorologiques pour le calcul des risques. La plupart des modèles utilisent des données au moment de la période critique d'infection ou adjacentes à cette période, mais certains modèles s'en écartent.

L'implantation dans CIPRA permet de mettre à l'essai les modèles. Chaque modèle utilise les données météorologiques (réelles et prévisionnelles selon le cas).

Les modèles prévisionnels utilisent généralement des stades ponctuels de développement comme point de référence pour le calcul de risque. C'était le cas des modèles mis à l'essai et sélectionnés dans le cadre d'un projet antérieur (Giroux et al. 2016). Considérant que la période de floraison du blé est critique pour l'infection par *Fusarium graminearum*, nous avons analysé différents groupes de paramètres de risque, soit des plages de stades de développement et les niveaux de risque moyens ou maximaux, en vue d'identifier les paramètres les plus performants pour la justesse de prévision des risques d'infection, plutôt que les indices de risque calculé ponctuellement aux stades de Zadoks Z61 ou Z65. Cette approche s'appuie sur le concept que l'ensemble de la période de sensibilité peut être mise à profit pour une meilleure estimation du risque.

Dans cet objectif de caractériser la plage des stades à risque d'infection, six paramètres ont été sélectionnés : (A) les indices ponctuels de risque au stade Z61 et au stade Z65 (2 paramètres), (B) les indices de risque maximal entre les stades Z61-Z65 et entre les stades Z61-Z69 (2 paramètres) et, (C) les indices de risque moyen entre les stades Z61-Z65 et entre les stades Z61-Z69 (2 paramètres). Pour ces paramètres, les stades Z61, Z65 et Z69 correspondent respectivement aux dates de début d'anthèse, de mi-anthèse et de fin d'anthèse de l'épi du blé, ce qui correspond à la période où la culture du blé est la plus à risque d'être infectées par *Fusarium sp.*

Les analyses en cours du projet ont permis de retirer les indices calculés sur la base des stades ponctuels des stades Z61 et Z65. Ceux-ci représentent mal le risque de fusariose sur l'ensemble de la période de sensibilité. Ensuite, les indices de risque maximal et moyen entre Z61 à Z69 n'ont pas été retenus. Malgré que la sensibilité du blé face à la fusariose puisse s'étendre tout au long de la période de floraison, le risque d'infection est davantage élevé du début de la floraison jusqu'à la mi-floraison (Stades Z61 à Z65). De plus, si une intervention phytosanitaire s'avère nécessaire, il est recommandé de l'effectuer avant le stade Z65. Finalement l'indice de risque moyen entre les stades Z61 et Z65 a été retenu comme le meilleur indice de risque. L'indice de risque maximal pour la même plage (Z61 à Z65) a montré des résultats beaucoup plus variables.

L'analyse qui permet d'évaluer et de sélectionner les meilleurs modèles est nommée l'analyse ROC (Receiver Operating Characteristic). Ce type d'analyse montre la relation entre la proportion de vrais positifs (sensibilité) et la proportion de faux positifs (1 - spécificité) et le meilleur modèle maximise les proportions de vrais positifs (la prédiction d'épidémies avérées) et de vrais négatifs (non prédiction d'épidémies en absence d'épidémies réelles). L'analyse permet aussi d'obtenir le seuil optimal pour un modèle donné. Ce seuil permet de déterminer s'il s'agit d'une situation d'épidémie ou de non-épidémie dépendant s'il est surpassé ou non, respectivement. De plus, les analyses permettent de générer plusieurs statistiques sur la performance du modèle (AUC, sensibilité, spécificité et l'exactitude).

Un premier groupe d'analyses a été fait en utilisant les données 2007-2014. Il est important de mentionner que les modèles AAC 2018a et 2018b, Parent #1 et #2, US-QC et Shah-QC ont tous été

calibrés à partir des jeux de données de 2007 à 2014. Ceci confère, d'entrée de jeu, un avantage à ces modèles pour leurs performances en regard de ce jeu de données.

Les Tableaux 1 et 2, ainsi que la Figure 4 de l'Annexe 3 montrent les bonnes performances de l'ensemble des modèles mis à l'essai avec les données 2007-2014. Ces résultats ne permettent pas de discriminer suffisamment les modèles donc d'en rejeter les moins performants et d'en sélectionner les meilleurs. Les modèles qui ont été conceptualisés et calibrés spécifiquement à partir de ces jeux de données (AAC 2018a et 2018b, Parent #1 et #2, US-QC et Shah-QC), bénéficiaient d'un avantage en termes de performance par rapport aux autres modèles. En considérant seulement les modèles qui n'ont pas été développés à partir de ces jeux de données, l'ordre des modèles en termes de performance sur la base de l'AUC (aire sous la courbe) et l'exactitude serait De Wolf B, De Wolf A, Shah, CAM 2018 et US (Tableaux 1 et 2).

Une seconde série d'analyses a été menée avec les données 2016-2017. Dans ce cas, tous les modèles ont une chance égale en termes d'évaluation. Les résultats sont présentés aux Tableaux 3 et 4, ainsi qu'à la Figure 5 de l'Annexe 3. Les modèles de Shah-QC, AAC 2018 (a et b) et Parent (#1 et 2) ont obtenu un AUC non significativement différent de 0.5. De ce fait, leurs prédictions ne sont pas plus valables que le tirage au sort (ex. : pile ou face). Les modèles CAM 2018, De Wolf B, De Wolf A, Fusariose, Shah, CAM 2017, US, US-QC sont tous significativement différent de 0.5 en termes d'AUC au seuil de  $P \leq 0.05$  (Tableau 3). De plus, il s'agit de leur ordre décroissant d'AUC pour l'indice de risque moyen entre les stades Z61 et Z65. En regard de la statistique AUC (aire sous la courbe), les modèles CAM 2018, De Wolf B, De Wolf A, Fusariose et Shah pourraient être utilisés si on considère un seuil significatif de  $P \leq 0.01$  (Tableau 3). Or, des points de vue de la sensibilité et de la spécificité, c'est-à-dire la proportion de vrais positifs sur l'ensemble des cas positifs et la proportion de vrais négatifs sur l'ensemble des cas négatifs, au moins un de ces deux critères est inférieur à 0.5 dans le cas de tous les modèles, sauf CAM 2018, De Wolf B et CAM 2017.

Pour conclure, en considérant les différents critères d'évaluation des différents modèles, soit l'AUC, l'exactitude, la sensibilité et la spécificité, il ne reste que les modèles de CAM 2018 et De Wolf B qui possèdent des résultats satisfaisants quant à leurs prédictions pour les deux jeux de données confondus et en prenant en considération l'indice de risque moyen entre les stades Z61 et Z65 (Tableau 5).

Sur un plan pratique, le modèle De Wolf B présente une contrainte défavorable. Il requiert des données météo allant jusqu'à dix jours après l'anthèse, or, les agriculteurs nécessitent une prédiction du risque en toute fin de l'épiaison jusqu'en début de la floraison (stade Z61) puisque c'est à partir de ce moment qu'un fongicide devrait être appliqué, si nécessaire, et au plus tard à la mi-floraison (Z65), afin d'optimiser le traitement de répression de la maladie. Le modèle s'appuie donc sur des prévisions météorologiques plus étendues qui sont forcément moins précises que les données plus resserrées du modèle CAM 2018.

Le modèle CAM 2018 est sélectionné sur la base de sa performance et devra remplacer le modèle CAM 2017 actuellement implanté dans CIPRA et Agrométéo Québec.

## **DIFFUSION DES RÉSULTATS** (Maximum de ½ page)

Le transfert des résultats de ce projet est des plus simples, il suffit de l'implanter dans la plate-forme d'Agrométéo Québec. Tel que démontré au cours de la saison 2017, il s'agit d'une méthode de transfert technologique très efficace, puisque la plate-forme rejoint l'ensemble de la clientèle et que celle-ci n'a pas à modifier ses pratiques. De plus, le passage au modèle CAM 2018 par rapport au modèle CAM 2017 déjà implanté dans Agrométéo Québec simplifie beaucoup la mise à niveau. La plate-forme est déjà calibrée pour les variables du nouveau modèle.

Les résultats de ce projet seront diffusés ou annoncés d'abord en ciblant les clientèles par le biais des publications et des communiqués usuels du Réseau d'avertissements phytosanitaires grandes cultures (RAP-GC). Les bulletins ou avertissements, le blogue et d'autres voies (dont Agri-Réseau) seront mis à contribution.

Nous pouvons envisager une affiche pour la journée « Phytoprotection du CRAAQ » en saison 2018. Nous pouvons évaluer la pertinence d'une communication orale, mais généralement, les événements propices se tiennent à l'automne ou en hiver (automne 2018 ou début hiver 2019).

Nous pouvons envisager un bref communiqué scientifique (telle que la revue Phytoprotection) si nous pouvons identifier un journal approprié à ce genre de communication.

### **APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE** (Maximum de ½ page)

L'application est directe à la suite de l'implantation dans Agrométéo Québec.

Une précision accrue des niveaux de risque conduit à de meilleures décisions quant à l'opportunité, la nécessité (ou son absence) d'utiliser un traitement fongicide de répression. Ces informations et cette meilleure prise de décision mènent à une efficacité accrue des traitements lorsque les conditions sont favorables à la maladie et, en contrepartie, une meilleure confiance dans la décision de ne pas faire usage de fongicide lorsque les conditions ne sont pas favorables à la maladie.

### **POINT DE CONTACT POUR INFORMATION**

Yves Dion (M.SC.), agronome

Sous-ministériat du développement régional et du développement durable

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)

Direction régionale de la Montérégie, secteur Est

1355, rue Daniel-Johnson Ouest, bureau 3300

Saint-Hyacinthe, QC J2S 8W7

Téléphone : 450 778-6530 p.6110

Courriel : [yves.dion@mapaq.gouv.qc.ca](mailto:yves.dion@mapaq.gouv.qc.ca)

### **REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS**

Ce projet a été réalisé en vertu du volet 4 du programme Prime-Vert 2013-2018 et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) par l'entremise de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021.

Nous remercions les partenaires qui ont contribué en nature au projet, soit par ordre alphabétique, Agriculture et Agroalimentaire Canada (Centre de recherche et de développement de Saint-Jean-sur-Richelieu), Agriculture et Agroalimentaire Canada (Direction des Sciences et de la technologie, Québec), le Centre de recherche sur les grains (Saint-Mathieu-de-Beloeil), les Moulins de Soulanges (Saint-Polycarpe).





## ANNEXE(S)

## Annexe 1

**Base de données 2007-2014**  
**Données provenant d'essais réalisés en centres de**  
**recherche**

Année	Nombre d'unités expérimentales par site					TOTAL
	BE	SA	NO	AC	LP	
2007	3	3				6
2008	3	3				6
2009	2	2	2		3	9
2010	2	2	2		3	9
2011	9	9	6	6		30
2012	6	6	6	6		24
2014	2	2	2			6
<b>Nombre total d'unités expérimentales</b>						<b>90</b>

**Codes des sites expérimentaux :**

BE : Saint-Mathieu-de-Beloeil (CÉROM)

SA : Saint-Augustin-de-Desmaures (Université Laval)

NO : Normandin (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

AC : L'Acadie (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

LP : La Pocatière (Centre de développement bioalimentaire du Québec)

## Annexe 2

**Base de données 2016-2017 — Tableau 1**  
**Données provenant du Réseaux grandes cultures du Québec (RGCQ)**  
**et de clubs agroenvironnementaux**

Année	Réseau	Nombre d'unités expérimentales par site						TOTAL
		Site						
		BE	ND	HE	BO	SF	SN	
2016	RGCQ		3					3
2017	RGCQ	3	3	3				9
2017	Club AE				1	1	1	3
<b>Nombre d'unités expérimentales — Sous-total du Tableau 1</b>								<b>15</b>

**Base de données 2016-2017 — Tableau 2**  
**Données provenant d'essais menés sur des sites d'exploitants agricoles, en**  
**collaboration**  
**avec les Moulins de Soulanges**

Année	Collaboration	Nombre d'unités expérimentales par site										TOTAL
		Site										
		LM-01	LM-02	LM-03	LM-04	LM-05	ES-01	ES-02	ES-03	MT-01	MT-02	
2017	Moulins	1	1	1	1	1	15	13	4	13	11	61
<b>Nombre d'unités expérimentales — Sous-total du Tableau 2</b>											<b>61</b>	
<b>Nombre total d'unités expérimentales, (Tableau 1 et 2) — Base de données 2016-2017</b>											<b>76</b>	

**Codes des sites expérimentaux :**

- BE : Saint-Mathieu-de-Beloeil (CÉROM)
- ND : Notre-Dame de Saint-Hyacinthe (La Coop fédérée)
- HE : Hébertville (Agriculture et Agroalimentaire Canada)
- BO: Notre-Dame-de-Bonsecours (collaboration du Club des Services Agroenvironnementaux de l'Outaouais )
- SF : Saint-Fabien, MRC de Rimouski-Neigette (collaboration du Club JMP Consultants)
- SN : Saint-Noël, MRC de La Matapédia (collaboration du Club JMP Consultants )
- LM-01 : Site d'exploitant agricole en Lanaudière-Mauricie
- LM-02 : Site d'exploitant agricole en Lanaudière –Mauricie
- LM-03 : Site d'exploitant agricole en Lanaudière –Mauricie
- LM-04 : Site d'exploitant agricole en Lanaudière –Mauricie
- LM-05 : Site d'exploitant agricole en Lanaudière –Mauricie
- ES-01 : Site d'exploitant agricole en Estrie
- ES-02 : Site d'exploitant agricole en Estrie
- ES-03 : Site d'exploitant agricole en Estrie
- MT-01 : Site d'exploitant agricole en Montérégie
- MT-02 : Site d'exploitant agricole en Montérégie

# ÉVALUATION DE MODÈLES PRÉVISIONNELS DE LA FUSARIOSE DE L'ÉPI DU BLÉ

Rapport préparé en avril 2018 par Sabrina Cloutier (stagiaire de l'Université de Sherbrooke) et Gaétan Bourgeois (chercheur scientifique en bioclimatologie et modélisation d'AAC).

Rapport révisé par Yves Dion (chercheur au MAPAQ) et Sylvie Rioux (chercheuse en phytopathologie au CÉROM)

Tous les modèles prévisionnels ont été implantés dans le logiciel CIPRA par Nathalie Beaudry (programmeur informatique en bioclimatologie et modélisation à AAC). Des remerciements sont aussi adressés à Antoine Plourde-Rouleau (stagiaire de l'Université de Sherbrooke) pour la préparation des jeux de données pour les années 2007 à 2014.

## TABLE DES MATIERES

<a href="#">Bases de données</a> .....	2
<a href="#">Modèles testés</a> .....	2
<a href="#">Modèles déjà implantés dans CIPRA (Centre Informatique de Prévisions des Ravageurs en Agriculture)</a> .....	2
<a href="#">Nouveaux modèles implantés dans CIPRA</a> .....	2
<a href="#">Variables des différents modèles</a> .....	3
<a href="#">Paramètres sélectionnés</a> .....	4
<a href="#">Précision sur la manière de calculer les différents paramètres</a> .....	5
<a href="#">Si le modèle donne des prédictions horaires (ex.: Modèles De Wolf A et De Wolf B) :</a> .....	5
<a href="#">Si le modèle donne des prédictions quotidiennes (ex.: Modèles CAM 2017 et CAM 2018) :</a> .....	5
<a href="#">Analyses ROC</a> .....	5
<a href="#">Sélection des paramètres d'évaluation parmi les 6 proposés</a> .....	6
<a href="#">Sélection du modèle le mieux adapté pour évaluer les risques de fusariose du blé</a> .....	6
<a href="#">Données de 2007 à 2014</a> .....	6
<a href="#">Données de 2016 et 2017</a> .....	6
<a href="#">Conclusions</a> .....	7
<a href="#">Bibliographie</a> .....	8
<a href="#">Tableaux 1 à 5</a> .....	9
<a href="#">Figures 3 à 7</a> .....	11

## **BASES DE DONNÉES**

Pour évaluer les modèles de fusariose de l'épi du blé, des données recueillies de 2007 jusqu'à 2014 ont été utilisées. Cette base de données est composée de 90 jeux de données et 37% de ceux-ci avaient des teneurs en DON  $\geq 1$  ppm. Pour chacun de ceux-ci, l'année, le site, les observations phénologiques du blé et la concentration de DON ont été colligés. De plus, les estimations des dates de début de floraison (Z61), de pleine floraison (Z65) et de fin de floraison (Z69) ont été interpolées à l'aide du logiciel CIPRA (Module « Phénologie du blé de printemps ») et ce à partir de observations phénologiques effectuées au champ. Cette base de données a été strictement dédiée à la calibration de plusieurs des modèles évalués dans le cadre de ce projet.

Une seconde base de données contenant des données de 2016 à 2017 a été obtenue dans le cadre du présent projet. Cette base de données est composée de 76 jeux de données et 43% de ceux-ci avaient des teneurs en DON  $\geq 1$  ppm. Chacun des jeux de données de cette nouvelle base de données possèdent essentiellement les mêmes informations que la première base de données. Cette base de données a été strictement dédiée à la validation des modèles évalués dans le cadre de ce projet. En conséquence, aucun des jeux de données de cette dernière base n'ont été utilisés dans la conceptualisation, l'élaboration et/ou la calibration des modèles évalués.

## **MODÈLES TESTÉS**

### **MODÈLES DÉJÀ IMPLANTÉS DANS CIPRA (CENTRE INFORMATIQUE DE PRÉVISIONS DES RAVAGEURS EN AGRICULTURE)**

- Les modèles prévisionnels De Wolf A, De Wolf B et CAM 2017 étaient déjà implantés dans le logiciel CIPRA (Plouffe et al. 2014). Le modèle CAM 2017 (acronyme de CÉROM, AAC, MAPAQ) est celui qui a été implanté dans CIPRA et Agrométéo Québec au printemps 2017. Il a été utilisé pour les prévisions des risques de fusariose de l'épi du blé pendant la saison 2017.

### **NOUVEAUX MODÈLES IMPLANTÉS DANS CIPRA**

- Deux modèles ont été proposés par Claude Parent (Parent #1 et Parent #2). Ceux-ci ont été élaborés à partir de la première base de données.
- Un modèle américain (US), possiblement celui utilisé actuellement sur le site Web américain, a été intégré à partir de l'équation 10c à la page 912 de l'article de Shah et al (2013). De plus, une adaptation du modèle US, nommée subséquentement US-QC et utilisant les mêmes variables météo, a été préparée à partir des jeux de données du Québec recueillies de 2007 à 2014. Après avoir effectué une transformation logarithmique sur les valeurs de DON ( $DON_{tr} = \ln(DON)$ ) pour normaliser celles-ci, les coefficients de US-QC ont été estimés à partir des jeux de données de 2007 à 2014.
- Un deuxième modèle américain, celui de Shah, a été intégré à partir de l'équation 12 décrite dans le Tableau 2 (p. 913) de l'article de Shah et al (2013). Il est important de noter que les valeurs des différents coefficients de cette équation nous ont été fournies gracieusement par Dr. Shah (communication personnelle). De plus, une adaptation du modèle Shah, nommée subséquentement Shah-QC et utilisant les mêmes variables météo, a été préparée à partir des

jeux de données du Québec recueillies de 2007 à 2014. Après avoir effectué une transformation logarithmique sur les valeurs de DON ( $DON_{tr} = \ln(DON)$ ) pour normaliser celles-ci, les coefficients de Shah-QC ont été estimés à partir des jeux de données de 2007 à 2014.

- Une deuxième version du modèle CAM 2017 a été ajoutée et nommée CAM 2018. Cette nouvelle version visait à corriger quelques problématiques observées au cours de la saison 2017.
- Afin d'inclure la période phénologique du blé sensible à l'infection par *Fusarium* sp., deux modèles additionnels, AAC 2018a et AAC 2018b, ont été élaborés à partir des jeux de données de 2007 à 2014.
- Le modèle "Fusariose" a été bâti à l'aide de courbes de réponse à la température et à la mouillure disponible dans le module d'infection générique des maladies des cultures du logiciel CIPRA.

## VARIABLES DES DIFFÉRENTS MODÈLES

À titre d'informations comparatives, les plages temporelles couvertes par chacun des modèles prévisionnels, décrits ci-dessous, par rapport à la période de sensibilité du blé à la fusariose de l'épi sont illustrées à la Figure 3 (Voir à la fin de ce rapport).

De Wolf B (-7 à +10 jrs, Jour 0 à Z65)

- Nombre d'heures où la température était entre 15 et 30°C avant anthèse (Z65)
- Nombre d'heures où la température était entre 15 et 30°C et l'humidité relative  $\geq 90\%$  après anthèse (Z65)

De Wolf A (Jour Z65 à +10 jrs)

- Nombre d'heures où la température était entre 15 et 30°C et l'humidité relative  $\geq 90\%$

CAM 2017 (-8 à +5 jrs, Jour 0 à Z61)

- Cumul des précipitations quotidiennes
- Précipitation maximale horaire du jour 0
- Nombre d'heures où la température était entre 15 et 30°C et l'humidité relative  $\geq 90\%$

CAM 2018 (-8 à +5 jrs, Jour 0 à Z61)

- Cumul des précipitations quotidiennes
- Nombre d'heures où la température était entre 15 et 30°C et l'humidité relative  $\geq 90\%$

Parent #1 (-37 à -7 jrs du Jour Z61)

- Nombre de jours de précipitations (>0mm) avec une humidité relative moyenne  $\geq 73\%$  durant la période des jours -37 à -7 jrs du stade Z61
- Somme du nombre de périodes indépendantes de 6 heures consécutives avec une humidité relative  $\geq 90\%$  durant la période des jours -15 à -11 jrs du stade Z61

Parent #2 (-25 à -9 jrs du Jour Z61)

- Nombre de jours de précipitations (>0mm) avec une humidité relative moyenne  $\geq 73\%$  durant la période des jours -25 à -9 jrs du stade Z61

- Somme du nombre de périodes indépendantes de 6 heures consécutives avec une humidité relative  $\geq 90\%$  durant la période des jours -15 à -11 jrs du stade Z61

US et US-QC (-7 à 0 jrs du Jour Z61)

- Humidité relative moyenne des jours -7 à 0 jrs du stade Z61

Shah et Shah-QC (-15 à 0 jrs du Jour Z61)

- Nombre d'heures avec température entre 15 et 30°C et l'humidité relative  $\geq 80\%$
- Moyenne des températures horaires
- Nombre d'heures où la température  $< 9^\circ\text{C}$

AAC 2018a (-12 à 0 jrs du Jour Z61)

- Nombre d'heures où l'humidité relative  $\geq 80\%$
- Nombre d'heures où les précipitations  $\geq 7.5$  mm
- Bilan hydrique (Moyenne des précipitations quotidiennes moins l'évapotranspiration moyenne quotidienne)

AAC 2018b (-12 à +4 jrs, Jour 0 à Z65)

- Radiation solaire moyenne de -12 à -1 jrs du stade Z65
- Nombre d'heures où les précipitations  $\geq 2.5$  mm de 0 à +4 jrs du stade Z65
- Nombre d'heures où l'humidité relative  $\geq 80\%$  de -12 à +4 jrs du stade Z65

Fusariose (Indice de risque d'infection)

- Courbe de réponse à la température : optimum à 25 (Figure 1)
- Courbe de réponse à la mouillure : optimum à 30 heures (Figure 2)

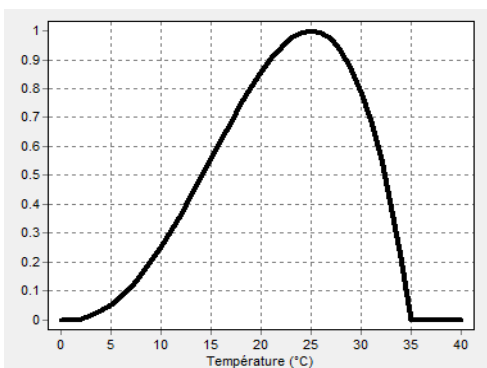


Figure 1. Courbe de réponse à la température

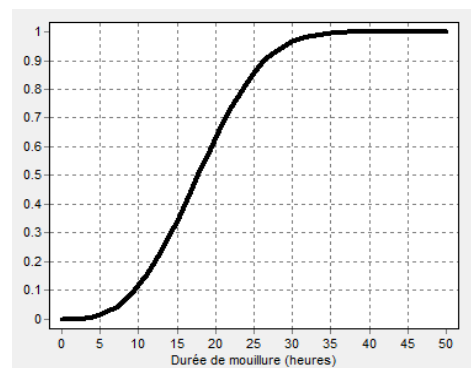


Figure 2. Courbe de réponse à la mouillure

## **PARAMÈTRES SÉLECTIONNÉS**

Une fois les modèles implantés dans le logiciel CIPRA, il a été possible d'obtenir les différentes prévisions en choisissant une année, un modèle et une station météo associés à chacun des jeux de données disponibles. Pour chaque jour ou heure (certains modèles fonctionnent en mode quotidien et d'autres en mode horaire), une prédiction du risque de fusariose est produite. Dans l'objectif de caractériser la plage des stades à risque d'infection, six paramètres ont été sélectionnés : (A) les

indices ponctuels de risque au stade Z61 et au stade Z65 (2 paramètres), (B) les indices de risque maximal entre les stades Z61-Z65 et entre les stades Z61-Z69 (2 paramètres) et, (C) les indices de risque moyen entre les stades Z61-Z65 et entre les stades Z61-Z69 (2 paramètres). Pour ces paramètres, les stades Z61, Z65 et Z69 correspondent respectivement aux dates de début d'anthèse, de mi-anthèse et de fin d'anthèse de l'épi du blé. Cette zone a été sélectionnée puisqu'elle est la période où la culture du blé est la plus à risque d'être infectées par *Fusarium* sp.

Ces paramètres ont été classés comme ceux qui devraient donner la meilleure indication quant à la concentration de mycotoxine DON retrouvée en fin de saison, donc s'il y a eu épidémie ou non selon le seuil de 1 ppm qui a été sélectionné pour tenir compte des incertitudes associées aux observations sur le terrain, aux mesures météorologiques et aux prévisions des différents modèles évalués (Giroux et al. 2016).

### **PRÉCISION SUR LA MANIÈRE DE CALCULER LES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES**

#### **SI LE MODÈLE DONNE DES PRÉDICTIONS HORAIRES (EX.: MODÈLES DE WOLF A ET DE WOLF B) :**

- (A) Indices de risque aux stades Z61 et Z65 : Indice calculé à partir des données météorologiques disponible à 12h00.
- (B) Indice de risque maximal entre les stades Z61 et Z65, puis entre les stades Z61 et Z69 : Prendre la valeur maximale entre le jour correspondant au stade Z61 à 12h00 et le jour du stade Z65 à 12h00, puis la valeur maximale entre le jour du stade Z61 à 12h00 et le jour du stade Z69 à 12h00 (les valeurs pour chaque heure sont considérées).
- (C) Indice de risque moyen entre les stades Z61 et Z65, puis entre les stades Z61 et Z69 : Calculer la valeur moyenne entre le jour correspondant au stade Z61 à 12h00 et le jour du stade Z65 à 12h00, puis la valeur moyenne entre le jour du stade Z61 à 12h00 et le jour du stade Z69 à 12h00 (les valeurs pour chaque heure sont considérées).

#### **SI LE MODÈLE DONNE DES PRÉDICTIONS QUOTIDIENNES (EX.: MODÈLES CAM 2017 ET CAM 2018) :**

D'abord, la moyenne entre chaque journée (de Z61 à Z69) est obtenue pour avoir la donnée à 12h00. Ensuite, le même protocole que les prédictions horaires a été utilisé. Or, la moyenne est réalisée à partir des données de minuit et de midi (0h00 et 12h00) au lieu des données de chaque heure.

### **ANALYSES ROC**

Toutes les analyses ROC (« Receiver Operating Characteristic ») ont été réalisées à l'aide du logiciel XLStat. Ce type d'analyse montre la relation entre la proportion de vrais positifs (sensibilité) et la proportion de faux négatifs (1 - spécificité). Ces analyses permettent aussi d'obtenir le seuil optimal pour un modèle donné. Ce seuil permet de déterminer s'il s'agit d'une situation d'épidémie ou de non épidémie dépendant s'il est surpassé ou non, respectivement. De plus, les analyses permettent de générer plusieurs statistiques sur la performance du modèle (AUC, sensibilité, spécificité et l'exactitude).

## **SÉLECTION DES PARAMÈTRES D'ÉVALUATION PARMIS LES 6 PROPOSÉS**

Considérant que la période de floraison du blé est critique pour l'infection par *Fusarium graminearum*, nous avons analysé différents groupes de paramètres de risque, soit des plages de stade et les niveaux de risque moyens ou maximaux, en vue d'identifier les paramètres les plus performants pour la justesse de prévision des risques d'infection. Les indices de risque aux stades Z61 et Z65 ont d'abord été retirés puisqu'ils représentent mal le risque de fusariose sur l'ensemble de la période de sensibilité. Effectivement, il s'agit d'une valeur ponctuelle prise pour caractériser un intervalle de temps continu. Ainsi, ceci peut mener à une perte d'information et ainsi biaiser l'estimation du risque biologique.

Ensuite, les indices de risque maximal et moyen entre Z61 à Z69 n'ont pas été retenus. Malgré que la sensibilité du blé face à la fusariose puisse s'étendre tout au long de la période de floraison, le risque d'infection est davantage élevé du début de la floraison jusqu'à la pleine floraison (Stades Z61 à Z65). De ce fait, il devient moins critique de considérer la phase Z65 à Z69 puisque la sensibilité des plants diminue.

Finalement, à la suite de l'examen de l'ensemble des analyses effectuées dans le cadre de cette évaluation des modèles, seulement l'indice de risque moyen entre les stades Z61 et Z65 a été conservé et sera présenté dans les résultats. De son côté, l'indice de risque maximal pour la même s'est traduit par des résultats beaucoup variables.

## **SÉLECTION DU MODÈLE LE MIEUX ADAPTÉ POUR ÉVALUER LES RISQUES DE FUSARIOSE DU BLÉ**

### **DONNÉES DE 2007 À 2014**

En premier lieu, il est important de noter que les modèles AAC 2018a et 2018b, Parent #1 et #2, US-QC et Shah-QC ont tous été calibrés à partir des jeux de données de 2007 à 2014.

À la suite des analyses ROC effectués avec ces jeux de données, les modèles évalués ont obtenu des aires sous la courbe (AUC) se situant entre 0.75 et 0.94 (Tableau 1, Figure 4) et une exactitude allant de 0.78 à 0.9 (Tableau 2). Ainsi, avec ces jeux de données, tous les modèles performant bien et montrent des résultats similaires, ce qui rend la discrimination de l'un par rapport l'autre ardue. Toutefois, on peut noter que les modèles CAM 2017 et Fusariose ont des valeurs de sensibilité inférieures à 0.70 (Tableau 2), ce qui les rend moins efficaces que les autres modèles évalués. En conséquence, si la culture de blé est dans une situation d'épidémie, les modèles ne donneraient une réponse positive que 67 % ou 52 % du temps, respectivement.

De plus, certains modèles, qui ont été conceptualisés et calibrés spécifiquement à partir de ces jeux de données, bénéficiaient d'un avantage en termes de performance par rapport aux autres modèles. En considérant seulement les modèles qui n'ont pas été développés à partir de ces jeux de données, l'ordre des modèles en termes de performance sur la base de l'AUC (aire sous la courbe) et l'exactitude serait De Wolf B, De Wolf A, Shah, CAM 2018 et US (Tableaux 1 et 2).

### **DONNÉES DE 2016 ET 2017**

Dans ce cas de ces jeux de données, tous les modèles ont une chance égale en termes d'évaluation car ces données n'ont pas été utilisées pour calibrer ceux-ci.



À la suite des analyses ROC effectués avec ces jeux de données, les modèles évalués ont obtenu des aires sous la courbe (AUC) se situant entre 0.47 et 0.72 (Tableau 3, Figure 5) et une exactitude allant de 0.42 à 0.66 (Tableau 4). Les modèles de Shah-QC, AAC 2018 (a et b) et Parent (#1 et 2) ont obtenu un AUC non significativement différent de 0.5. De ce fait, leurs prédictions n'est pas plus valable que le tirage au sort (ex. : pile ou face). Les modèles CAM 2018, De Wolf B, De Wolf A, Fusariose, Shah, CAM 2017, US, US-QC sont tous significativement différent de 0.5 en termes d'AUC au seuil de  $P \leq 0.05$ . De plus, il s'agit de leur ordre décroissant d'AUC pour l'indice de risque moyen entre les stades Z61 et Z65.

Ainsi, du point de vue de l'AUC, les modèles CAM 2018, De Wolf B, De Wolf A, Fusariose et Shah pourraient être utilisés si on considère un seuil significatif de  $P \leq 0.01$  (Tableau 3). Or, des points de vue de la sensibilité et de la spécificité, c'est-à-dire la proportion de vrai positif sur l'ensemble des cas positif et la proportion de vrai négatif sur l'ensemble des cas négatif, au moins un de ces deux critères est inférieur à 0.5 dans le cas des tous les modèles, sauf CAM 2018, De Wolf B et CAM 2017. Pour ces trois modèles, l'exactitude se situe entre 0.63 et 0.66, la sensibilité entre 0.67 et 0.79 et la spécificité entre 0.56 et 0.60 (Tableau 4).

## **CONCLUSIONS**

Somme toute, si on considère les différents critères d'évaluation des différents modèles, soit l'AUC, l'exactitude, la sensibilité et la spécificité, il ne reste que les modèles de CAM 2018 et De Wolf B qui possèdent des résultats satisfaisants quant à leurs prédictions pour les deux jeux de données confondus et en prenant en considération l'indice de risque moyen entre les stades Z61 et Z65 (Tableau 5).

Toutefois, il faut aussi considérer une contrainte à l'implantation du modèle De Wolf B. En effet, celui-ci requiert des données météo allant jusqu'à dix jours après l'anthèse (le pic d'anthèse étant au stade Z65). Par contre, les agriculteurs seront intéressés par la prédiction de modèles un peu avant le début de la floraison (stade Z61) puisque c'est à partir de ce moment qu'un fongicide devrait être appliqué si nécessaire. Ainsi, en utilisant de tels modèles, les prévisions seront basées sur des prévisions météorologiques à plus long terme et très incertaines, ce qui aura pour conséquence d'augmenter fortement l'incertitude sur les indices de risque de fusariose obtenus.

Finalement, le modèle CAM 2018, qui remplacerait le modèle CAM 2017 actuellement implanté dans CIPRA et Agrométéo Québec, donne globalement de meilleurs résultats. Effectivement, sur les données de 2007 à 2014 la performance du modèle CAM 2018 pour tous les critères d'évaluation est légèrement supérieure ou égale au modèle CAM 2017. En plus, pour les données de 2016 et 2017, les mêmes résultats sont obtenus, excepté pour la spécificité qui est approximativement 4% plus bas pour le modèle CAM 2018 (Tableau 4).

Pour toutes ces raisons, parmi tous les modèles évalués, il est recommandé d'utiliser le modèle CAM 2018 et d'implanter celui-ci dans Agrométéo Québec pour la saison 2018. De plus, son utilisation potentielle en mode opérationnel, soit en utilisant des prévisions météo d'Environnement Canada en temps réel, démontre une efficacité fort intéressante. Ce potentiel a été évalué en 2017 pour les stations météo de L'Acadie et Normandin en simulant les indices de risque à l'aide des prévisions

météo que nous avons archivées en juin 2017 et en comparant ces indices simulés avec ceux générés avec les mesures météo réelles de chacune des stations (Figures 6 et 7).

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Giroux, M.E., G. Bourgeois, Y. Dion, S. Rioux, D. Pageau, S. Zoghlami, C. Parent, E. Vachon, and A. Vanasse. 2016. Evaluation of forecasting models for wheat Fusarium head blight under growing conditions of Quebec, Canada. *Plant Disease* 100: 1192-1201.
- Plouffe, D., G. Bourgeois, N. Beaudry, G. Chouinard, and D. Choquette. 2014. CIPRA - Centre Informatique de Préviation des Ravageurs en Agriculture: Guide des cultures. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Bulletin technique, A42-119/2013F-PDF. 138 p.
- Shah, D.A., J.E. Molineros, P.A. Paul, K.T. Willyerd, L.V. Madden, and E.D. De Wolf E.D. 2013. Predicting Fusarium head blight epidemics with weather-driven pre- and post-anthesis logistic regression models. *Phytopathology* 103(9): 906-919.

## TABLEAUX 1 À 5

Tableau 1. Aires sous la courbe (AUC) et analyses comparatives avec la ligne de non-information obtenues avec les analyses ROC effectuées sur les jeux de données de 2007 à 2014 pour le paramètre du risque moyen entre Z61 et Z65.

Modèle	Youden	AUC	SE	Statistique Z	valeur de P
Parent #2	0.83	0.94	0.028	15.56	< 0.0001
Parent #1	0.81	0.94	0.027	15.98	< 0.0001
AAC 2018b	0.72	0.92	0.036	11.75	< 0.0001
Shah-QC	0.70	0.90	0.039	10.20	< 0.0001
De Wolf A	0.77	0.90	0.045	8.86	< 0.0001
De Wolf B	0.80	0.89	0.049	7.94	< 0.0001
Shah	0.75	0.89	0.041	9.43	< 0.0001
AAC 2018a	0.69	0.88	0.048	7.89	< 0.0001
US-QC	0.70	0.84	0.049	6.92	< 0.0001
CAM 2018	0.61	0.80	0.058	5.29	< 0.0001
CAM 2017	0.58	0.80	0.057	5.14	< 0.0001
US	0.61	0.80	0.055	5.40	< 0.0001
Fusariose	0.44	0.75	0.066	3.75	0.0002

Tableau 2. Paramètres de performance obtenus suite aux analyses ROC effectuées sur les jeux de données de 2007 à 2014 pour le paramètre du risque moyen entre les stades Z61 et Z65.

Modèle	Seuil optimal	Exactitude	Sensibilité	Spécificité	LR +	LR -
Parent #2	44.48	0.90	0.97	0.86	6.91	0.04
Parent #1	53.04	0.89	0.97	0.84	6.14	0.04
De Wolf B	27.87	0.89	0.94	0.86	6.69	0.07
De Wolf A	23.64	0.88	0.91	0.86	6.48	0.11
Shah	46.55	0.86	0.94	0.81	4.87	0.08
Shah-QC	0.94	0.86	0.82	0.88	6.66	0.21
AAC 2018b	0.53	0.84	0.91	0.81	4.71	0.11
US-QC	0.54	0.83	0.91	0.79	4.32	0.12
AAC 2018a	0.69	0.83	0.88	0.81	4.55	0.15
CAM 2018	24.02	0.80	0.82	0.79	3.89	0.23
US	62.70	0.80	0.82	0.79	3.89	0.23
CAM 2017	23.69	0.79	0.67	0.79	3.74	0.27
Fusariose	0.11	0.78	0.52	0.93	7.34	0.52

Tableau 3. Aires sous la courbe (AUC) et analyses comparatives avec la ligne de non-information obtenues avec les analyses ROC effectuées sur les jeux de données de 2016 à 2017 pour le paramètre du risque moyen entre Z61 et Z65.

Modèle	Youden	AUC	SE	Statistique Z	valeur de P
<b>CAM 2018</b>	0.40	<b>0.72</b>	0.062	3.51	0.0004
<b>De Wolf B</b>	0.45	<b>0.71</b>	0.063	3.32	0.0009
<b>De Wolf A</b>	0.39	<b>0.69</b>	0.064	2.99	0.0028
<b>Fusariose</b>	0.34	<b>0.69</b>	0.065	2.93	0.0034
<b>Shah</b>	0.37	<b>0.68</b>	0.064	2.81	0.0049
<b>CAM 2017</b>	0.31	<b>0.66</b>	0.064	2.46	0.0141
<b>US</b>	0.33	<b>0.64</b>	0.066	2.09	0.0363
<b>US-QC</b>	0.31	<b>0.64</b>	0.066	2.07	0.0383
<b>Shah-QC</b>	0.31	<b>0.60</b>	0.068	1.41	0.1594
<b>AAC 2018b</b>	0.28	<b>0.58</b>	0.069	1.16	0.2479
<b>AAC 2018a</b>	0.26	<b>0.52</b>	0.069	0.31	0.7530
<b>Parent #2</b>	0.28	<b>0.52</b>	0.078	0.24	0.8082
<b>Parent #1</b>	0.11	<b>0.47</b>	0.075	-0.37	0.7088

Tableau 4. Paramètres de performance obtenus suite aux analyses ROC effectuées sur les jeux de données de 2016 à 2017 pour le paramètre du risque moyen entre les stades Z61 et Z65.

Modèle	Seuil calibré	Exactitude	Sensibilité	Spécificité	LR +	LR -
<b>CAM 2018</b>	24.10	<b>0.66</b>	<b>0.79</b>	<b>0.56</b>	1.78	0.38
<b>De Wolf B</b>	27.47	<b>0.64</b>	<b>0.76</b>	<b>0.56</b>	1.71	0.43
<b>CAM 2017</b>	23.92	<b>0.63</b>	<b>0.67</b>	<b>0.60</b>	1.69	0.55
<b>US-QC</b>	0.54	<b>0.62</b>	<b>0.91</b>	<b>0.40</b>	1.50	0.23
<b>Shah-QC</b>	0.97	<b>0.59</b>	<b>0.79</b>	<b>0.44</b>	1.41	0.48
<b>Fusariose</b>	0.10	<b>0.59</b>	<b>0.42</b>	<b>0.72</b>	1.52	0.80
<b>Shah</b>	49.87	<b>0.58</b>	<b>0.94</b>	<b>0.30</b>	1.35	0.20
<b>AAC 2018b</b>	0.55	<b>0.58</b>	<b>0.85</b>	<b>0.37</b>	1.35	0.41
<b>De Wolf A</b>	23.13	<b>0.54</b>	<b>0.94</b>	<b>0.23</b>	1.22	0.26
<b>US</b>	63.55	<b>0.54</b>	<b>0.73</b>	<b>0.40</b>	1.20	0.69
<b>AAC 2018a</b>	0.68	<b>0.51</b>	<b>0.55</b>	<b>0.49</b>	1.07	0.93
<b>Parent #2</b>	43.28	<b>0.49</b>	<b>0.61</b>	<b>0.40</b>	1.00	1.00
<b>Parent #1</b>	54.66	<b>0.42</b>	<b>0.70</b>	<b>0.21</b>	0.88	1.45

Tableau 5. Résultats des analyses ROC de CAM 2018 et De Wolf B pour l'indice de risque moyen entre les stades Z61 et Z65

Modèles	AUC	Exactitude	Sensibilité	Spécificité	AUC	Exactitude	Sensibilité	Spécificité
	<u>Données 2007 à 2014</u>				<u>Données 2016 et 2017</u>			
<b>CAM 2018</b>	0.80	0.80	0.82	0.79	0.72	0.66	0.79	0.56
<b>De Wolf B</b>	0.89	0.89	0.94	0.86	0.71	0.64	0.76	0.56

### FIGURES 3 À 7

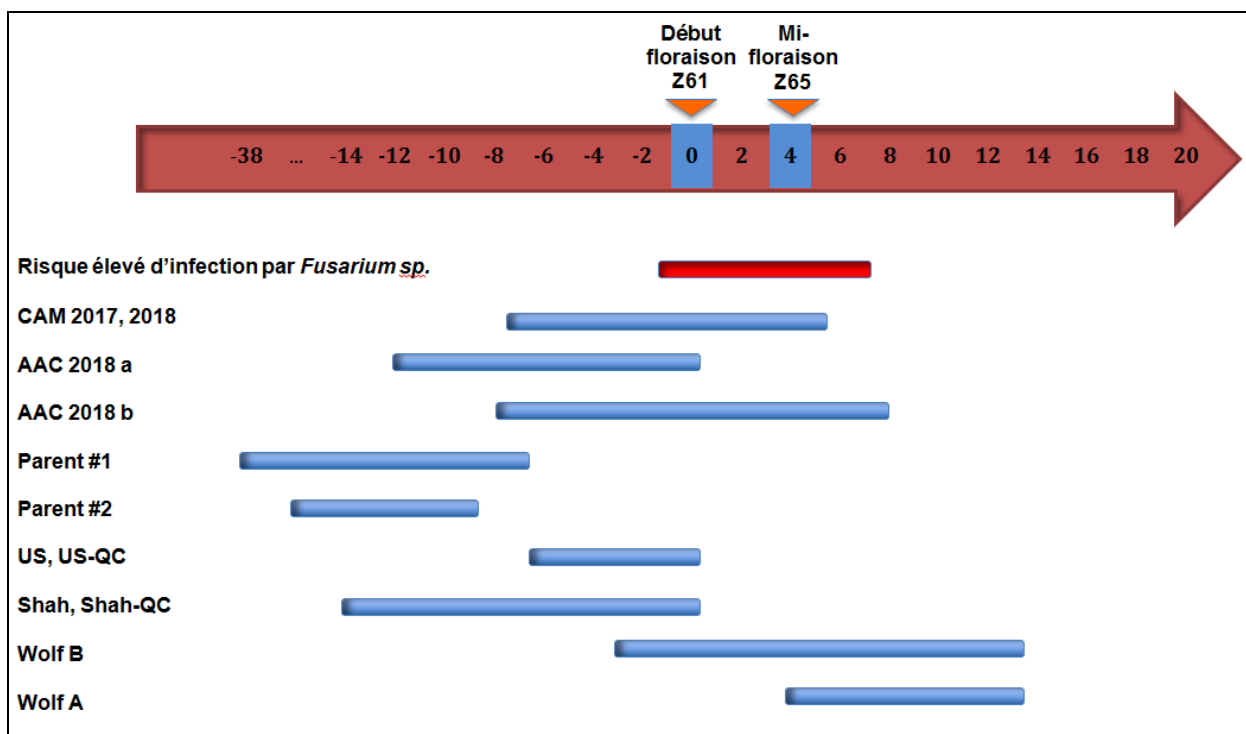


Figure 3. Plages temporelles couvertes par chacun des modèles prévisionnels rapport à la période de sensibilité du blé à la fusariose de l'épi.

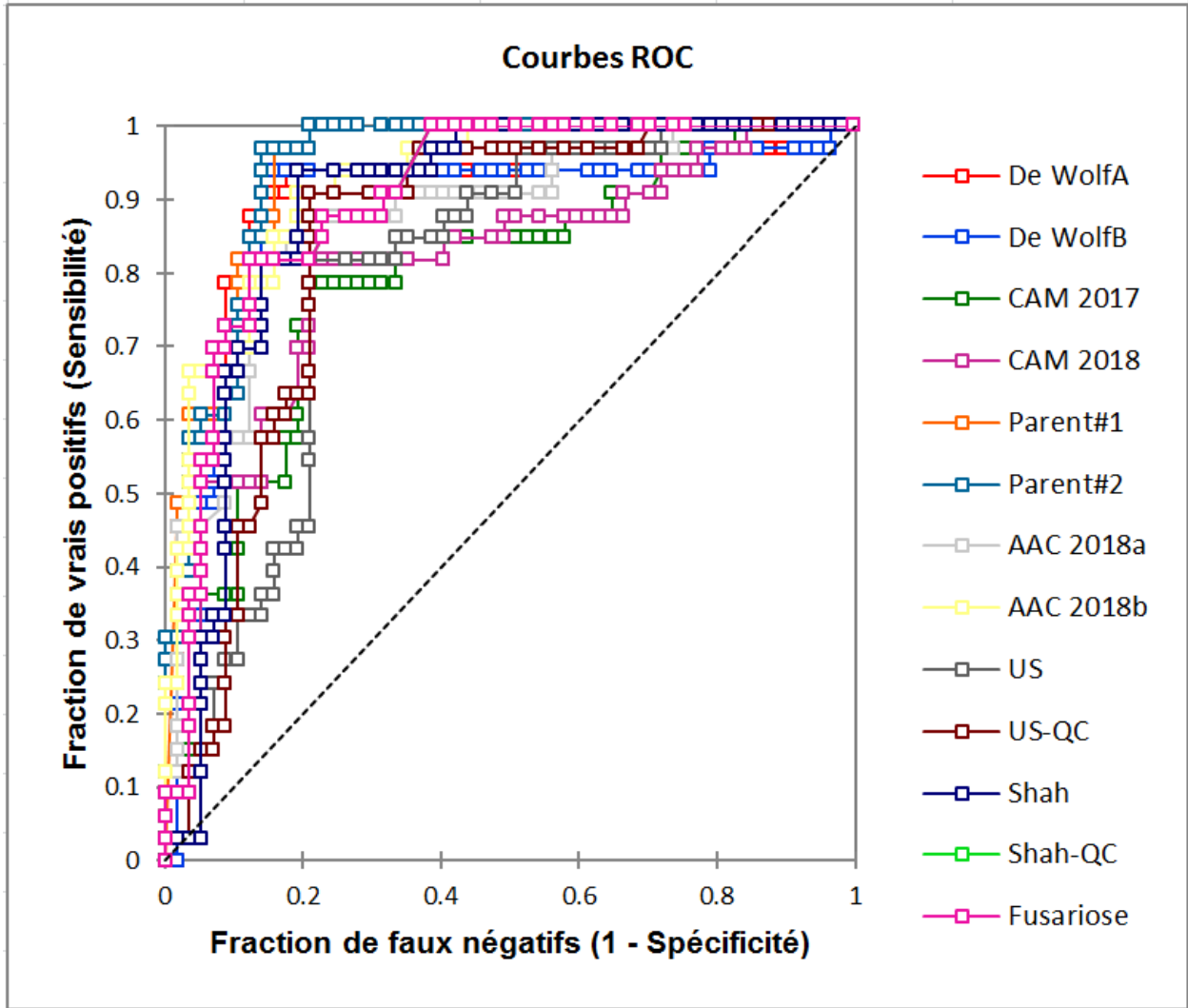


Figure 4. Courbes ROC de tous les modèles évalués avec les jeux de données 2007 à 2014

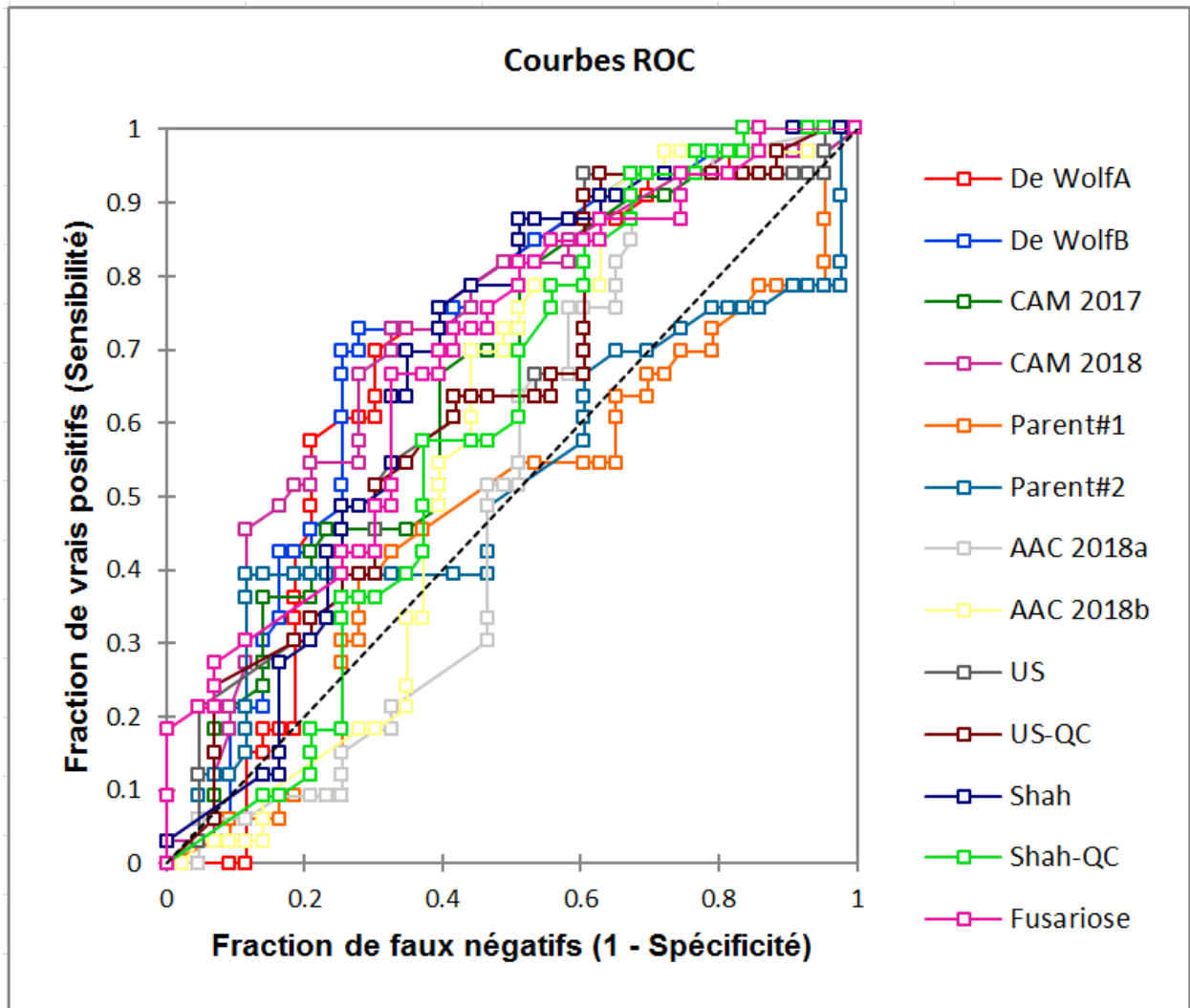


Figure 5. Courbes ROC de tous les modèles évalués avec les jeux de données 2016 à 2017

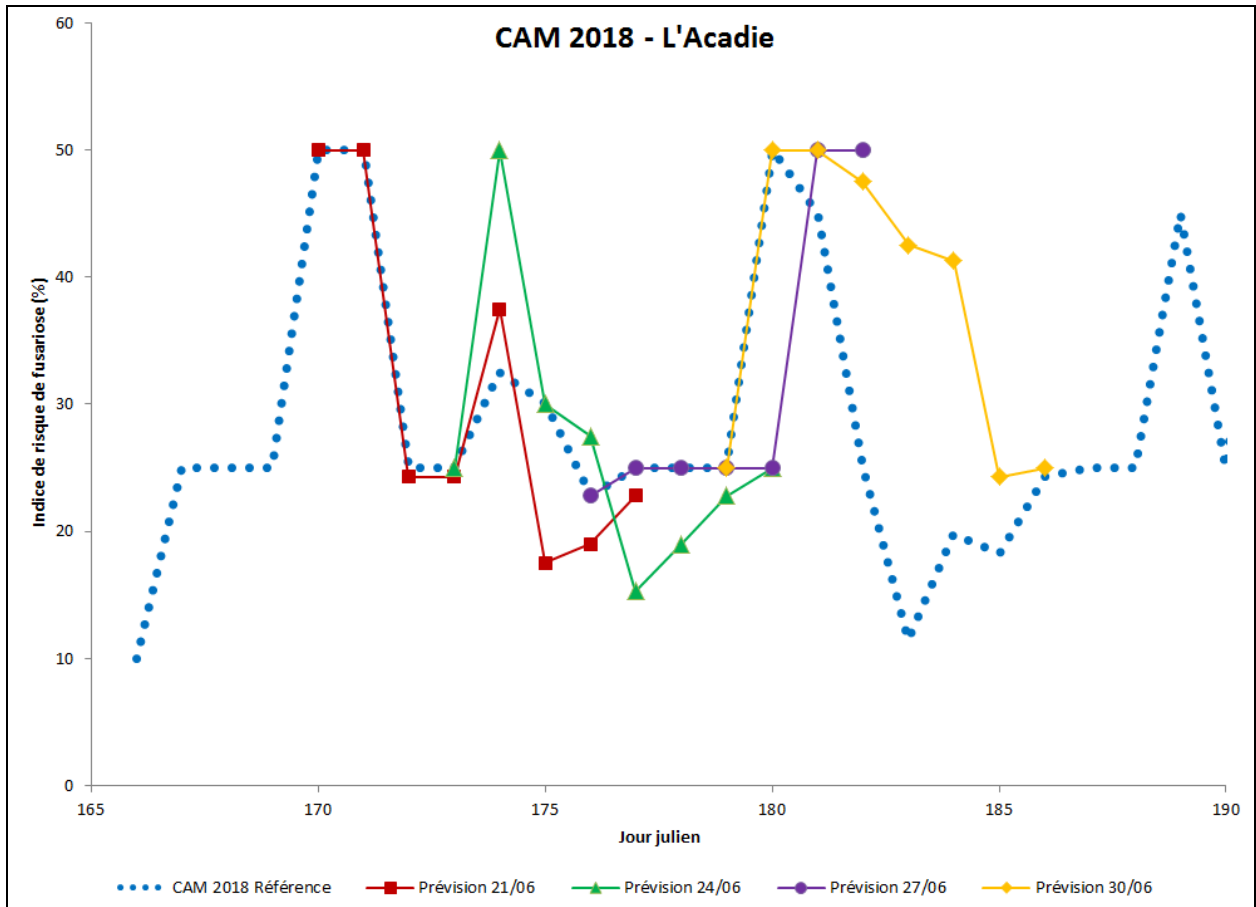


Figure 6. Prédications de l'indice de risque de fusariose générées à l'aide du modèle prévisionnel CAM 2018 avec les mesures météo effectuées à L'Acadie en 2017 et avec 4 prévisions météo fournies par Environnement Canada (21, 24, 27 et 30 juin 2017).



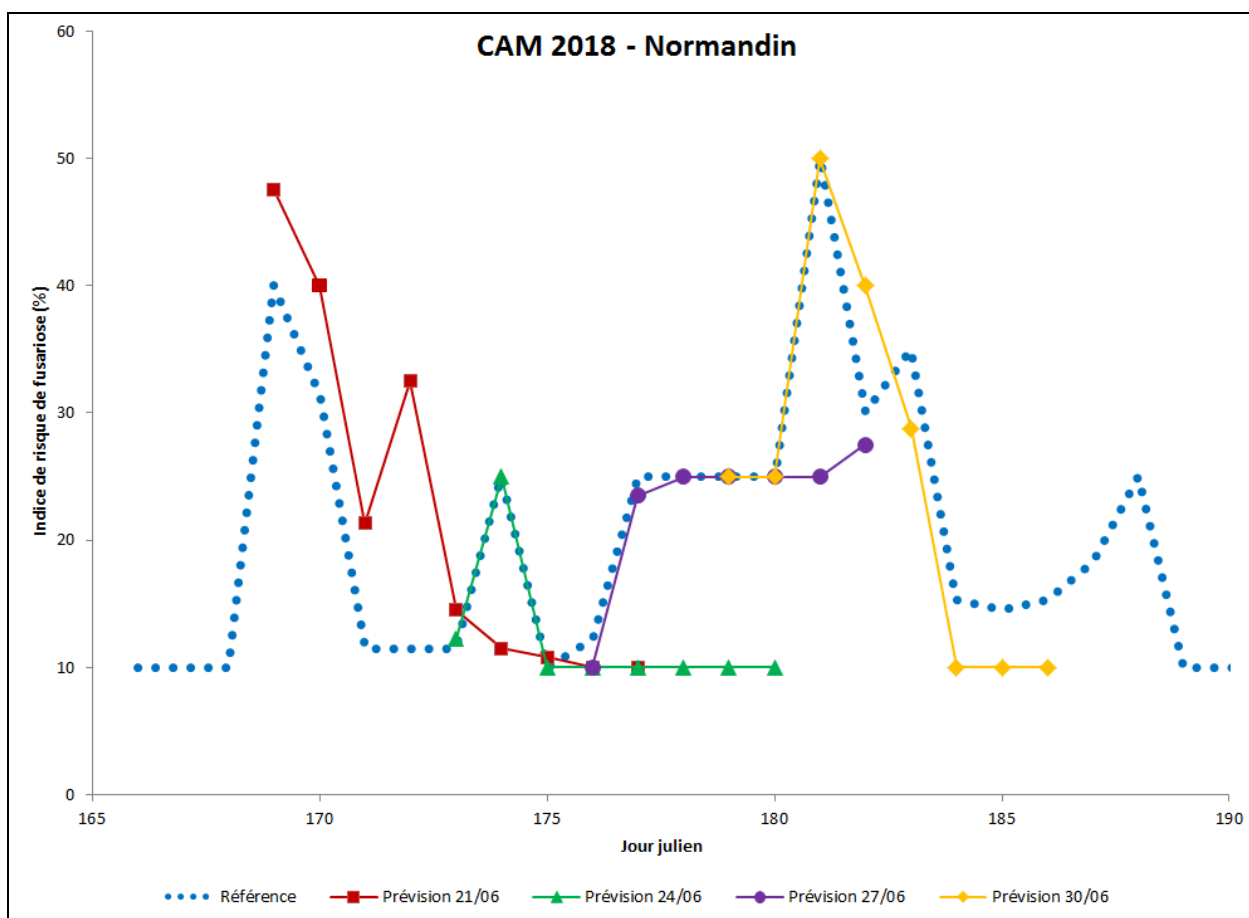


Figure 7. Prédiction de l'indice de risque de fusariose générées à l'aide du modèle prévisionnel CAM 2018 avec les mesures météo effectuées à Normandin en 2017 et avec 4 prévisions météo fournies par Environnement Canada (21, 24, 27 et 30 juin 2017).

## Annexe 4

**Tableau sommaire des variables utilisées par les différents modèles prévisionnels de la fusariose**

Modèle	Stade de référence au Jour 0 (Zadoks)	Période(s) utilisée(s) par rapport au Jour 0 (J0)	Variables	Modulation
De Wolf B	Z65	-7 à + 10 jours	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température (T°) entre 15 et 30 °C</li> <li>▪ T° entre 15 et 30 °C et humidité relative (HR) ≥ 90%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre d'heures avant Z65</li> <li>▪ Nombre d'heures après Z65</li> </ul>
De Wolf B	Z65	0 à + 10 jours	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ T° entre 15 et 30 °C et humidité relative (HR) ≥ 90%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre d'heures</li> </ul>
CAM 2017	Z61	-8 à + 5 jours	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cumul des précipitations quotidiennes</li> <li>▪ Précipitation maximale horaire du Jour 0</li> <li>▪ T° entre 15 et 30 °C et humidité relative (HR) ≥ 90%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre d'heures</li> </ul>
CAM 2018	Z61	-8 à + 5 jours	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cumul des précipitations quotidiennes</li> <li>▪ T° entre 15 et 30 °C et humidité relative (HR) ≥ 90%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre d'heures</li> </ul>
Parent #1	Z61	-37 à - 7 jours	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Précipitations (&gt; 0 mm) et HR ≥ 73 %</li> <li>▪ Périodes indépendantes de 6 heures consécutives à HR ≥ 90 % pendant la période -15 à -11 jours</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre de jours</li> <li>▪ Sommation des périodes</li> </ul>
Parent #2	Z61	-25 à - 9 jours	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Précipitations (&gt; 0 mm) et HR ≥ 73 %</li> <li>▪ Périodes indépendantes de 6 heures consécutives à HR ≥ 90 % pendant la période -15 à -11 jours</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre de jours</li> <li>▪ Sommation des périodes</li> </ul>
US et US-QC	Z61	Jour -7 à jour 0	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ HR moyenne</li> </ul>	
Shah et Shah-QC	Z61	Jour -15 à jour 0	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ T° entre 15 et 30 °C et HR ≥ 80 %</li> <li>▪ Moyenne des T° horaires</li> <li>▪ T° &lt; 9 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre d'heures</li> <li>▪ Nombre d'heures</li> </ul>
AAC 2018a	Z61	Jour -12 à jour 0	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ HR ≥ 80 %</li> <li>▪ Précipitations ≥ 7,5 mm</li> <li>▪ Bilan hydrique (moyenne des précipitations quotidiennes moins l'évapotranspiration moyenne quotidienne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre d'heures</li> <li>▪ Nombres d'heures</li> </ul>
AAC 2018b	Z65	-12 à + 4 jours	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Radiation solaire moyenne pour la période -12 à - 1 jours</li> <li>▪ Précipitations ≥ 2,5 mm pour la période 0 à +4 jours</li> <li>▪ HR ≥ 80 % pour la période - 12 à +4 jours</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre d'heures</li> <li>▪ Nombre d'heures</li> </ul>
Fusariose			<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Courbe de réponse à la température : optimum à 25 (Fig. 1 - Annexe 1)</li> <li>▪ Courbe de réponse à la mouillure : optimum à 30 hres (Fig. 2 Annexe 1)</li> </ul>	