



ÉVALUATION DU CONTENU EN MYCOTOXINES DE DIFFÉRENTS HYBRIDES DE MAÏS-GRAIN CULTIVÉS AU QUÉBEC

Mémoire

NAFISEH PARVARANDEH FARIMANI

**Maîtrise en biologie végétale
Maître ès Sciences (M.Sc.)**

Québec, Canada

Résumé

Comme les grains de maïs peuvent être infectés par certaines espèces de *Fusarium* qui produisent des mycotoxines pouvant affecter la santé des animaux, il est essentiel d'évaluer la qualité des grains pour assurer la performance des élevages. Les objectifs de ce projet sont de vérifier le contenu en mycotoxines des grains de différents hybrides de maïs soumis à plusieurs environnements et d'évaluer l'effet d'un fongicide foliaire sur la présence de mycotoxines. Généralement, les concentrations en mycotoxines [désoxynivalénol (DON), T2, zéaralénone (ZEN) et fumonisine (FUM)] des différents hybrides sont en-dessous des seuils critiques. Les concentrations en DON varient selon les hybrides, les années et les zones climatiques. Certains hybrides montrent une résistance stable, peu importe le site et l'année alors que la zone 3 (2300 à 2500 UTM) a été plus propice au développement du DON. L'application de fongicide n'a pas d'effet sur la production en mycotoxines.

Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Remerciements	xi
Avant-propos	xiii
1. Introduction	1
2. Revue de littérature	3
2.1 Fusariose de l'épi	3
2.1.1 Agents pathogènes responsables	3
2.1.2 Signes et symptômes visuels	4
2.1.3 Épidémiologie	4
2.1.3.1 <i>Sources d'inoculum</i>	5
2.1.3.2 <i>Dispersion de l'inoculum</i>	6
2.1.3.3 <i>Processus d'infection</i>	8
2.2 Fusariose de l'épi et du grain	9
2.2.1 Agents pathogènes responsables	9
2.2.2 Signes et symptômes visuels	10
2.2.3 Épidémiologie	11
2.2.3.1 <i>Sources d'inoculum et dispersion</i>	11
2.2.3.2 <i>Processus d'infection</i>	12
2.3 Mycotoxines	13
2.3.1 Trichothécènes	14
2.3.1.1 <i>Désoxynivalénol</i>	14
2.3.1.2 <i>T2</i>	15
2.3.2 Zéaralénone	16
2.3.3 Fumonisines	17
2.3.4 Méthodes pour le dosage des mycotoxines	17
2.4 Moyens de lutte	19
2.4.1 Choix des hybrides	19
2.4.2 Rotation des cultures	22
2.4.3 Travail du sol	23
2.4.4 Application de fongicides	26
3. Hypothèses et objectifs	31
4. Évaluation des concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) de différents hybrides de maïs-grain dans trois zones climatiques du Québec	33
4.1 Introduction	33
4.2 Matériel et méthodes	34
4.2.1 Mise en place des essais et prise de données	34
4.2.2 Analyses de mycotoxines	42
4.2.3 Analyses statistiques	42
4.3 Résultats et discussion	43
4.3.1 Contenus en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) des différents hybrides de maïs-grain selon les zones et les années	43
4.3.1.1 <i>Contenus en désoxynivalénol (DON)</i>	43
4.3.1.2 <i>Contenus en T2, en zéaralénone (ZEN) et en fumonisine (FUM)</i>	49

4.3.2 Évaluation des effets de l'année, du site et des hybrides de maïs-grain sur les contenus en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) sur des hybrides communs pour chaque zone	53
4.3.2.1 <i>Contenus en DON</i>	53
4.3.2.2 <i>Contenus en T2, ZEN et FUM</i>	59
4.3.2.3 <i>Conclusions</i>	66
4.3.3 Évaluation des effets de l'année, du site et de la zone sur les concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN, FUM) en créant une variable commune	66
4.3.3.1 <i>Contenus en DON</i>	67
4.3.3.2 <i>Contenus en T2, ZEN et FUM</i>	70
4.3.4 Effet de la maturité physiologique et du site sur les contenus en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) des hybrides de maïs-grain en 2009	76
4.3.5 Régressions	78
4.3.6 Conclusions.....	79
5. Effet de l'application de fongicide foliaire sur les concentrations en DON, T2, ZEN et FUM du maïs-grain	81
5.1 Introduction	81
5.2 Matériel et méthodes	81
5.2.1 Mise en place des essais et prise de données	81
5.2.2 Analyses de mycotoxines.....	83
5.2.3 Analyse statistiques.....	83
5.3 Résultats et discussion	83
5.4 Conclusions	87
6. Discussion générale et conclusion	89
6.1 Concentration en mycotoxines selon les effets de l'hybride de maïs-grain et de la zone climatique	89
6.2 Relation entre la maturité des hybrides de maïs-grain et les concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM)	91
6.3 Effet de l'application du fongicide foliaire Headline sur les concentrations en DON, T2, ZEN et FUM du maïs-grain	92
Bibliographie	93
Annexe A – Données météorologiques	107
Annexe B – Test d'ELISA	111
Analyse de la toxine DON	111
Analyse de la toxine T2.....	111
Analyse de la toxine ZEN	111
Analyse de la toxine FUM	112

Liste des tableaux

Tableau 1. Concentrations maximales en ppm de mycotoxines admissibles ou décrétées par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA)	14
Tableau 2. Zones et sites d'essais des Réseaux grandes cultures du Québec (RGCQ)	34
Tableau 3. Caractéristiques des sites expérimentaux en 2009	36
Tableau 4. Caractéristiques des sites expérimentaux en 2010	37
Tableau 5. Caractéristiques des sites expérimentaux en 2011	38
Tableau 6. Nombre d'hybrides de maïs-grain à l'essai pour chaque site expérimental en 2009	40
Tableau 7. Nombre d'hybrides de maïs-grain à l'essai pour chaque site expérimental pendant les années 2010 et 2011	40
Tableau 8. Répartition (%) des hybrides de maïs-grain selon quatre classes de concentration en désoxynivalénol (DON), ainsi que les valeurs minimum, maximum et moyenne de la concentration en DON des hybrides tardifs du RGCQ pour les trois zones climatiques au cours des années 2009, 2010 et 2011	49
Tableau 9. Répartition (%) des hybrides de maïs-grain répartis en deux classes de concentration en T2, ainsi que les valeurs minimum, maximum et moyenne de la concentration en T2 des hybrides tardifs du RGCQ pour les trois zones climatiques au cours des années 2009, 2010 et 2011	50
Tableau 10. Répartition (%) des hybrides de maïs-grain répartis en deux classes de concentration en zéaralénone (ZEN), ainsi que les valeurs minimum, maximum et moyenne de la concentration en ZEN des hybrides tardifs du RGCQ pour les trois zones climatiques au cours des années 2009, 2010 et 2011	51
Tableau 11. Répartition des hybrides de maïs-grain répartis en deux classes de concentration en fumonisine (FUM), ainsi que les valeurs minimum, maximum et moyenne de la concentration en FUM des hybrides tardifs du RGCQ pour les trois zones climatiques au cours des années 2009, 2010 et 2011	53
Tableau 12. Concentrations en DON des hybrides de maïs-grain communs dans les zones 1, 2 et 3 selon les années, les sites et les hybrides	55
Tableau 13. Concentrations en T2 des hybrides de maïs-grain communs dans les zones 1, 2 et 3 selon les années, les sites et les hybrides	61
Tableau 14. Concentrations en ZEN des hybrides de maïs-grain communs pour les zones 1, 2 et 3 selon les années, les sites et les hybrides	63
Tableau 15. Concentrations en FUM des hybrides de maïs-grain communs pour les zones 1, 2 et 3 selon les années, les sites et les hybrides	65
Tableau 16. Concentration moyenne en DON des hybrides de maïs-grain selon les années, les zones et les sites en tenant compte d'une variable commune	69
Tableau 17. Concentration moyenne en T2 des hybrides de maïs-grain selon les années, les zones et les sites en tenant compte d'une variable commune	71
Tableau 18. Concentration moyenne en ZEN des hybrides de maïs-grain selon les années, les zones et les sites en tenant compte d'une variable commune	73
Tableau 19. Concentration moyenne en FUM des hybrides de maïs-grain selon les années, les zones et les sites en tenant compte d'une variable commune	75

Tableau 20. ANOVA sur une variable commune aux hybrides de maïs-grain de l'année 2009 pour vérifier les effets de la maturité et du site, pour chacune des quatre mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM)	77
Tableau 21. Coefficients de régression linéaire entre les concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) et la présence visuelle de champignon et la maturité physiologique des hybrides de maïs-grain pour les zones 1, 2 et 3 et les années 2009, 2010 et 2011	79
Tableau 22. Date de semis et de récolte et fertilisation appliquée aux sites de Saint-Mathieu-de-Beloeil et de L'Assomption pour les années 2009, 2010 et 2011	82
Tableau 23. Concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN, FUM) des hybrides de maïs-grain testés en 2009, 2010 et 2011 aux sites de L'Assomption et de Saint-Mathieu-de-Beloeil avec ou sans application de fongicide.....	86

Liste des figures

Figure 1. Cycle épidémique de la fusariose de l'épi chez le blé et chez le maïs	4
Figure 2. Schéma descriptif des zones et des sites d'essais en 2009	39
Figure 3. Schéma descriptif des zones et des sites d'essais en 2010 et 2011	39
Figure 4. Concentration en DON des hybrides tardifs de maïs-grain du RGCQ pour la zone 1 en 2009, 2010 et 2011. Les bâtons en bleu (gris foncé) montrent les hybrides communs aux trois années dans une même zone	45
Figure 5. Concentration en DON des hybrides tardifs de maïs-grain du RGCQ pour la zone 2 en 2010 et 2011. Les bâtons en bleu (gris foncé) montrent les hybrides communs aux trois années dans une même zone	46
Figure 6. Concentration en DON des hybrides tardifs de maïs-grain du RGCQ pour la zone 3 en 2009, 2010 et 2011. Les bâtons en bleu (gris foncé) montrent les hybrides communs aux trois années dans une même zone	47
Figure 7. Concentration en DON des 19 hybrides de maïs-grain communs aux deux sites de Saint-Mathieu-de-Beloeil et de Saint-Hyacinthe (moyenne de 2010 et de 2011)	56
Figure 8. Concentration en DON des 13 hybrides de maïs-grain communs aux deux sites de Saint-Edmond et Saint-Alexis pour les deux années 2010 et 2011	57
Figure 9. Concentration en DON provenant des 22 hybrides de maïs-grain communs aux trois sites de Saint-Albert, Saint-Augustin et Princeville pour les années 2010 et 2011	59

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu ma directrice de recherche, Anne Vanasse, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce projet de maîtrise. Son soutien, ses conseils et ses connaissances profondes dans le domaine des grandes cultures m'ont toujours aidée et encouragée à développer mes connaissances en recherche agronomique. Merci infiniment Anne, tu m'as aidée beaucoup à réaliser le rêve que j'ai toujours eu en tête. En second lieu, merci à Gilles Tremblay, mon co-directeur de maîtrise, pour son soutien et sa disponibilité à mon égard tout au long de ce projet de maîtrise, et qui m'a aussi préparé des échantillons dans le cadre de ce projet. J'aimerais aussi remercier Sylvie Rioux qui m'a aidée à canaliser mes idées et a répondu à mes questions en phytopathologie.

Un merci tout spécial à Annie Brégard, professionnelle de recherche au Département de phytologie, pour son aide précieuse pour les analyses statistiques. Je désire également adresser mes remerciements les plus sincères à Nicole Bourget, professionnelle au laboratoire du Centre de recherche sur les grains (CÉROM) pour son aide technique et son expertise en analyses des mycotoxines ainsi que ses encouragements qui furent très appréciés.

J'aimerais aussi remercier Marie-Ève Giroux, étudiante à la maîtrise travaillant dans l'équipe de Mme Vanasse qui m'a aidée au cours de ce projet.

Je tiens aussi à remercier le Canadian Swine Research and Development Center (CSRDC) pour avoir financé ma maîtrise.

Un immense merci à Ali, mon chum, qui m'a soutenue dès le début de ma demande d'admission lorsque j'étais en Iran jusqu'à présentement et qui m'a énormément aidée et encouragée tout au long de ce processus. Mon cher Ali, ton écoute, ton calme et ta patience m'ont certainement aidée à finir mon mémoire!

Pendant ces années loin de mon pays, je me suis créé une famille d'amies. Adeleh, Hajar, Faranak, Fatemeh, Atieh et Sepideh, vous enrichissez ma vie.

Un dernier point qui est sans doute le plus important, j'aimerais remercier sincèrement ma famille pour avoir continué de croire en moi à me soutenir tout au long de ma maîtrise: mes grands-parents, Ghodrat et Zahra, mes parents Mohammad et Fatemeh et mes sœurs Naghmeh, Negareh et Negin. Papa et Mom, grâce à votre confiance, je peux vous écrire ces quelques lignes aujourd’hui. Ma chère Naghmeh, tu es non seulement ma sœur, mais aussi mon amie intime qui m’aura toujours soutenue dans tous les aspects de ma vie. J’aimerais dédier ce mémoire à ma famille qui est la raison de mon succès et de ma vie.

Avant-propos

Le présent mémoire est constitué de six chapitres. Le chapitre 1 fait une brève introduction du sujet de recherche. Le chapitre 2 présente une revue de littérature réalisée sur la fusariose de l'épi et la fusariose de l'épi et du grain, sur les mycotoxines que ces maladies fongiques produisent et enfin, les moyens de lutte disponibles contre ces maladies. Le chapitre 3 présente les hypothèses et objectifs de l'étude. Le chapitre 4 constitue le cœur du mémoire et traite de l'évaluation des concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) des différents hybrides de maïs-grain dans trois zones climatiques du Québec. Le chapitre 5 vérifie l'effet de l'application du fongicide foliaire Headline sur les concentrations en DON, T2, ZEN et FUM du maïs-grain. Enfin, un retour sur les hypothèses de recherche avec une discussion et une conclusion générale est effectué au chapitre 6.

Les résultats préliminaires de ce projet de recherche ont été présentés au symposium sur les mycotoxines à Boucherville en décembre 2012, à l'assemblée générale annuelle de la Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec (FPCCQ) à Drummondville en mars 2013 et au congrès annuel de la Société de protection des plantes du Québec (SPPQ) à Québec, en juin 2013. Trois résumés ont été produits pour la publication des comptes rendus de ces conférences.

1. Introduction

Les céréales et notamment le maïs-grain (*Zea mays* L.) sont les cultures les plus fréquemment touchées par les différentes espèces de *Fusarium*, partout dans le monde et en particulier dans l'est du Canada (Campbell et coll., 2002). Certaines espèces de *Fusarium* produisent des mycotoxines (métabolites secondaires de champignons) qui peuvent contaminer des plantes à la ferme ou à l'entreposage des aliments. Une telle infection chez le maïs-grain peut causer des baisses de rendement (Logrieco et coll., 2002; Wu, 2007) et la consommation de ces toxines peut avoir des impacts nocifs sur la santé des humains et des animaux (Bennett et Klich, 2003).

L'infection des épis de maïs par *Fusarium spp.* est associée à deux maladies différentes. D'abord, la fusariose de l'épi qui est principalement causée par *F. graminearum* (Vigier et coll., 1997). Les deux mycotoxines les plus communes qui sont souvent produites par ce champignon, sont le désoxynivalénol (DON) et la zéaralénone (ZEN). L'autre maladie est la fusariose de l'épi et du grain qui est principalement produite par *F. verticillioides*, dans l'est du Canada (Miller 1995; Reid et coll., 1999). Ce champignon produit la toxine fumonisine (FUM). De plus, une autre espèce de *Fusarium*, *F. sporotrichioides* peut jouer un rôle important dans la production de mycotoxines puisqu'elle produit la toxine T2 qui est très毒 (Mesterházy et coll., 2012).

Au Québec, le maïs-grain est la composante principale dans la diète en production animale, en particulier pour l'industrie porcine. Les contenus en mycotoxines des grains constituent un des critères importants pour évaluer la qualité du maïs-grain utilisé en production porcine. Selon l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA, 2012), le contenu en DON et en T2 de la ration porcine ne devrait pas dépasser le seuil de 1 ppm pour chacune de ces toxines. Pour la ZEN, cette valeur est de 0,25 ppm. L'ACIA n'a pas encore recommandé de seuil pour la toxine FUM au Canada, mais ce seuil est de 10 ppm aux États-Unis.

Les conditions environnementales telles que les précipitations et la température influencent l'apparition et la fréquence des espèces de *Fusarium* (Logrieco et coll., 2002; Stewart et

coll., 2002). La production des mycotoxines et en particulier le DON est étroitement liée aux conditions météorologiques, aux emplacements géographiques ainsi qu'aux hybrides de maïs (Vigier et coll., 2001; de la Campa et coll., 2005; Hooker et Schaafsma, 2005). Puisqu'il est impossible de contrôler le climat et de modifier l'emplacement géographique, une des seules alternatives s'offrant aux producteurs agricoles est de choisir des hybrides de maïs moins sensibles aux différents *Fusarium* et à la contamination par les mycotoxines qu'ils produisent. Toutefois, seulement quelques hybrides présentent une résistance constante d'une année à l'autre ou entre divers environnements (Schaafsma et coll., 1997). Le présent mémoire a pour objectif de vérifier les contenus en mycotoxines des hybrides de maïs-grain ensemencés dans différentes zones climatiques au Québec et d'évaluer les effets de l'application d'un fongicide foliaire sur les contenus en mycotoxines. Au cours des dernières années, l'utilisation des fongicides foliaires a été considérablement accrue dans le but d'augmenter les rendements (Paul et coll., 2011), mais leurs impacts sur les mycotoxines demeurent encore peu connus.

2. Revue de littérature

2.1 Fusariose de l'épi

La fusariose de l'épi, une des plus importantes maladies fongiques dans le monde, est produite par de nombreux agents pathogènes du genre *Fusarium* présents chez toutes les céréales cultivées (maïs, seigle, triticale, blé, orge, avoine) (Gilbert et Tekauz, 2000; Bailey et coll., 2004). La fusariose de l'épi est reconnue comme étant une des principales maladies d'importance économique en raison de son étendue mondiale, de l'intensité de ses symptômes, de sa fréquence et de la réduction du rendement qu'elle engendre (Xu, 2003). Malgré tous les efforts de recherche effectués à ce jour, cette maladie demeure un problème important pour les producteurs céréaliers (Windels, 2000). La fusariose de l'épi peut produire des mycotoxines qui sont présentes dans les grains fusariés. La présence de ces toxines réduit la qualité de la récolte et engendre des pertes monétaires aux producteurs (Xu, 2003). Par exemple, en 2006, la récolte de maïs-grain en Ontario avait été lourdement contaminée par le désoxynivalénol (DON). Sur plus de 2000 échantillons de maïs analysés, 83 % contenaient des niveaux de DON qui variaient entre 0,5 et 54 ppm, avec une moyenne de 4,8 ppm, représentant un manque à gagner pour les producteurs de maïs de cette province évalué à 60 millions de dollars (Schaafsma et Limay-Rios, 2008).

2.1.1 Agents pathogènes responsables

Environ 17 espèces de *Fusarium* sont impliquées dans l'apparition de la fusariose de l'épi (Bourdages et coll., 2006). Parmi les agents pathogènes responsables de cette maladie, *Fusarium graminearum* Schwabe [forme sexuée *Gibberella zeae* (Schwein.) Petch] est l'espèce prédominante et la plus agressive dans une grande partie du monde, en particulier dans les climats tempérés et chauds des États-Unis, du Canada, de la Chine et de l'hémisphère sud (Leonard et Bushnell, 2003; Bailey et coll., 2004; Osborne et Stein, 2007). D'autres espèces régulièrement observées dans les zones favorables en Europe sont *F. culmorum* (Wm. G. Smith) Sacc. et *F. avenaceum* [télémorphe : *Gibberella avenacea* R.J. Cook] (Desjardins, 2006).

2.1.2 Signes et symptômes visuels

La fusariose de l'épi chez le maïs grain est reconnaissable par la moisissure rose à rougeâtre qui recouvre l'épi et qui débute la plupart du temps à l'extrémité de l'épi ou à partir d'une blessure d'insecte ou d'oiseaux. De plus, on peut observer que les rafles de maïs deviennent spongieuses et que les spathes délavées adhèrent étroitement aux grains (Bailey et coll., 2004). On remarque également la présence de périthèces noirs sur les spathes plus tard dans la saison (Bailey et coll., 2004; Mesterházy et coll., 2012).

2.1.3 Épidémiologie

Le meilleur modèle décrivant la fusariose chez les céréales et qui est utilisé la plupart du temps dans la littérature, est le cycle épidémiologique de *F. graminearum*. Cet agent pathogène est le plus répandu dans le monde (Osborne et Stein, 2007). Le schéma du cycle épidémiologique de la fusariose de l'épi (figure 1) facilitera la compréhension des trois prochains points portant sur l'épidémiologie.

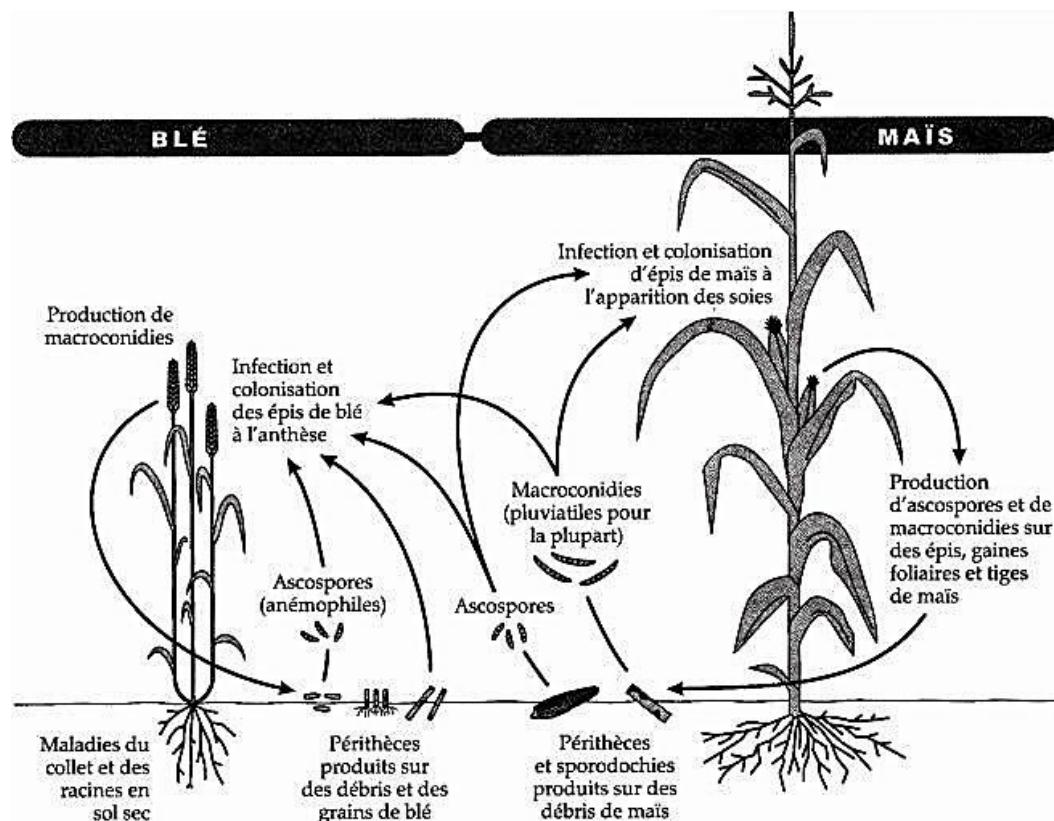


Figure 1. Cycle épidémique de la fusariose de l'épi chez le blé et chez le maïs

Source: adapté de Bailey et coll., 2004

2.1.3.1 Sources d'inoculum

F. graminearum survit durant l'hiver sur les résidus de culture (Bailey et coll., 2004). Les résidus en provenance de précédents culturaux hôtes comme le maïs, le blé et l'orge et parfois non-hôtes comme le soya sont des sources d'inoculum primaire (Baird et coll., 1997; McMullen et coll., 1997). Les résidus de culture de maïs comprenant la tige, la racine, les spathes et les pièces de l'épi ainsi que les grains, sont les plus importantes sources d'inoculum de *Fusarium* (Osborne et Stein, 2007). En d'autres termes, les tissus qui se décomposent moins rapidement, comme les nœuds des tiges de graminées, jouent un rôle important dans la survie des espèces de *Fusarium* (Sutton, 1982). De plus, en produisant des chlamydospores entre les périodes de rotation des cultures, les champignons peuvent survivre longtemps dans le sol (Nyvall et Kommedahl, 1968; Sutton, 1982). Il est également possible que les champignons infectent les plantes sénescentes et saines laissées sur le terrain (Cotton et Munkvold, 1998). Enfin, malgré le fait que le cycle épidémiologique de la fusariose de l'épi soit considéré comme une maladie monocyclique, on observe l'effet du sol, des mauvaises herbes et des plantes indigènes qui peuvent aussi agir comme d'autres réservoirs d'inoculum primaire (Sutton, 1982; Fernando et coll., 1997; Shaner, 2003; Madden et Paul, 2009).

Lorsque les conditions environnementales sont réunies, le champignon produit du mycélium et par la suite, on observe l'apparition de périthèces et de sporodochies. Un peu plus tard, on observe l'apparition des ascospores qui proviennent des périthèces. Les périthèces du téléomorphe de *G. zaeae* se développent lorsque les températures sont de 13 à 33°C avec un optimum à 29°C, alors que les ascospores préfèrent des températures de 25 à 28°C (Sutton, 1982). Quant aux sporodochies, qui sont des structures de l'anamorphe de *F. graminearum*, elles sont responsables de la production de conidies entre des températures variant de 16 à 36°C avec un optimum situé entre 28 et 32°C (Doohan et coll., 2003). Les fragments d'hyphes, les ascospores (spores sexuées), les macroconidies (spores asexuées) et les chlamydospores constituent l'inoculum primaire de *F. graminearum*. Parmi ceux-ci, les ascospores et les macroconidies sont les propagules principales de l'infection et il semble que les ascospores soient la forme la plus répandue (Sutton, 1982; Inch et coll., 2005).

2.1.3.2 Dispersion de l'inoculum

Le déplacement des propagules de *Fusarium* dans l'air est déterminé par des processus de libération, de transport à la dérive et de dépôt (Schmale et coll., 2006). Le relâchement des ascospores requiert un cycle de déshydratation-réhydratation des périthèces. Les recherches effectuées par Fernando et coll. (2000), Inch et coll. (2005) et Paulitz (1996) montrent que les quantités d'ascospores retrouvées dans l'air varient pendant la journée et dépendent de l'humidité relative de l'air. Selon les travaux mentionnés, il y a moins d'ascospores retrouvées dans l'air le matin et les périthèces sont déshydratés. Au cours de l'après-midi, on a noté une augmentation graduelle des quantités de spores corrélées avec la hausse de l'humidité relative. Donc, le cycle déshydratation-réhydratation déclenche la rupture des périthèces et le relâchement de beaucoup d'ascospores. La libération d'ascospores est réalisée entre 11 et 23°C avec une température optimale de 16°C (Tschanz et coll., 1976; Sutton, 1982). Par ailleurs, selon Schmale et coll. (2006), des précipitations peuvent également être une composante importante de dépôt des spores. Dans cette étude, trois événements majeurs de déposition des spores ont coïncidé avec une période de pluie. De même, Franci et coll. (1999) et Markell et Franci (2003) ont rapporté que le pic de dépôt des spores serait observé une à deux journées après les précipitations.

Puisque l'éjection des ascospores par les périthèces se fait sur de très faibles distances (quelques millimètres) elles sont dispersées principalement par le mouvement de l'air (Trail et coll., 2005). Selon plusieurs études, la dispersion des spores par le vent peut varier considérablement. Parmi ces études, les travaux effectués par Fernando et coll. (2000) indiquent que la plupart des ascospores se sont déposées dans un rayon de 5 m à partir d'une source localisée d'ascospores et l'infection des grains par ces dernières a diminué de 10 % dans un rayon de 5 à 22 m dans les parcelles inoculées. Il semblerait donc que les ascospores soient dispersées sur des distances relativement courtes (Gilbert et Fernando, 2004). Dans les champs proches de régions épidémiques, l'inoculum aurait été détecté en quantités beaucoup plus élevées que dans les champs éloignés des régions épidémiques ou des régions non épidémiques (Franci et coll., 1999). Par exemple, une étude effectuée sur la concentration des ascospores de *G. zaeae* dans l'est du Canada démontre une diminution de 50 % à moins de 18 m et de 90 % à moins de 60 m de la source ponctuelle, ce qui appuie

l'idée d'un court parcours des ascospores (de Luna et coll., 2002). Ces résultats ont aussi été confirmés par l'étude de Del Ponte et coll. (2003) sur la distribution spatiale de l'incidence de la fusariose de l'épi et par les recherches de Maldonado-Ramirez et coll. (2005) sur l'abondance relative des spores viables de *G. zaeae* dans l'atmosphère s'étendant de 50 m à 1 km au-dessus de la surface du sol. Toutefois, ces auteurs ont aussi observé du transport de spores sur de longues distances et ce, plus fréquemment en régions épidémiques (Franci et coll., 1999; de Luna et coll., 2002). En 2005, une étude effectuée dans divers environnements cultivés a démontré qu'à partir d'une source atmosphérique d'inoculum uniforme, les modes temporels de déposition des spores viables étaient presque identiques. Cela renforce l'hypothèse que les spores sont capables de se déposer sur de longues distances à partir de la source d'inoculum (Schmale et coll., 2006). De plus, Ponte et coll. (2003) ont observé des ascospores à plus de 180 m au-dessus du sol, sur des lacs et dans des régions éloignées des champs agricoles, en utilisant des avions radiocommandées et des bateaux piégeant des spores. Cependant, la contribution relative des sources d'inoculum provenant soit de l'extérieur ou de l'intérieur du champ est encore inconnue, mais pourrait varier selon les régions, les cultures et les pratiques culturales (Gilbert et Fernando, 2004).

Parry et coll. (1995) ont suggéré que les macroconidies pluviatiles sont dispersées principalement par les éclaboussures de pluie et par le vent et que la dispersion éloignée serait peu fréquente (Xu et Berrie, 2005). Le phénomène de dispersion par la pluie a été également confirmé par les travaux de Jenkinson et Parry (1994), Hörberg (2002) de même que par Rossi et coll. (2002). En effet, la quantité de macroconidies serait nulle ou faible avant un épisode de pluie, mais augmenterait progressivement pendant la pluie pour atteindre un pic alors que l'humidité relative est élevée. Une chute rapide de la quantité de spores serait observée simultanément avec la baisse d'humidité relative (Rossi et coll., 2002). Bien que la pluie facilite la dispersion des propagules (Franci et coll., 1999; Thomas et coll., 1999, Rossi et coll., 2002), il n'est pas encore possible de démontrer une relation cohérente entre le nombre de spores enregistrées dans les expériences de piégeage et la quantité réelle des précipitations (Xu et Berrie, 2005).

Finalement, il faut mentionner que les oiseaux et les insectes sont également des vecteurs de la dispersion des espèces de *Fusarium* (Sutton, 1982). Néanmoins, cette voie est moins importante et probablement négligeable comparativement au vent et à la pluie.

2.1.3.3 Processus d'infection

L'infection du maïs grain par *Fusarium spp.* peut se faire selon deux voies principales : 1) par l'infection au moment de l'apparition des soies ou lors de la période de maturation des grains; 2) par les blessures sur les grains qui sont causées par des oiseaux et des insectes (Sobek et Munkvold, 1999).

D'après Champeil et coll. (2004), la période la plus critique de l'infection correspondrait au moment où le degré de résistance à l'infection primaire et de la propagation de l'hyphe fongique dans la plante est le plus faible. Chez le maïs, les périodes critiques les plus sensibles à l'infection correspondent aux six premiers jours après l'apparition des soies et pendant la période de maturation des grains (Reid et Hamilton, 1996; Blandino et Reyneri, 2010). L'infection des soies est la source majeure pour la fusariose de l'épi (Desjardins et coll., 2002). À la fin de la saison de croissance, les grains atteignent le stade de maturité physiologique. À ce moment-là, les mécanismes de défense de la plante sont relativement inactifs, les tissus sont vieillissants et le niveau de résistance de la plante est minimal (Rioux et Fortin, 2008). En conséquence, une simple pluie durant cette période apporterait suffisamment d'humidité pour que les espèces de *Fusarium* qui sont présentes dans le grain poursuivent leur développement (Rioux et Fortin, 2008). Quant à la deuxième voie de l'infection, il a été démontré que la fusariose de l'épi est moins fréquemment causée par des blessures (Munkvold, 2003b).

2.2 Fusariose de l'épi et du grain

La fusariose de l'épi et du grain est moins répandue et elle apparaît souvent dans les régions chaudes et sèches comme le sud de l'Ontario (Bailey et coll., 2004).

2.2.1 Agents pathogènes responsables

La fusariose de l'épi et du grain est causée souvent par *Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg. (syn. *F. moniliforme* J. Sheld.; forme sexuée = *Gibberella moniliformis* Wineland), *F. proliferatum* (T. Matsushima) Nirenberg (forme sexuée *G. fujikuroi* (Saw.) Wr. var. *intermedia* Kuhlmann) et *F. subglutinans* (Wollenweb. & Reinking) P.E. Nelson, T.A. Toussoun & Marasas (forme sexuée *G. subglutinans* P.E. Nelson, T.A. Toussoun & Marasas) (Bailey et coll., 2004; Miller et coll., 2007). Parmi ces espèces, *F. verticillioides* est l'espèce la plus régulièrement observée dans les zones chaudes et sèches du Canada, des États-Unis et des plaines tropicales (Miller, 1994; Bailey et coll., 2004).

Si on compare les espèces associées aux différentes maladies (fusariose de l'épi et fusariose de l'épi et du grain), on constate que leur virulence varie considérablement. L'espèce *F. graminearum* est la plus virulente tandis que *F. verticillioides* et d'autres espèces de *Fusarium* sont considérées moins virulentes (Wong et coll., 1992; Mesterházy et coll., 2012).

Selon l'étude réalisée par Mesterházy et coll. (2012), il y a également certaines espèces de *Fusarium* qui n'ont été jamais regroupées dans ces deux catégories de maladie de fusariose de l'épi et de fusariose de l'épi et du grain et leurs symptômes et conditions épidémiologiques sont mal documentées. Donc, on observe que ces espèces sont regroupées la plupart du temps dans la catégorie d'espèces causant la fusariose de l'épi. Néanmoins, les mycotoxines de ces espèces jouent des rôles importants comme la toxine T2 qui est très toxique et est produite par *F. poae* et *F. sporotrichioides*. L'espèce *F. sporotrichioides* Sherb. est souvent observée au Canada, aux États-Unis et en Europe (Mesterházy et coll., 2012) alors que l'espèce, *F. poae* (Peck.) Wollenweb. in Lewis a été identifiée comme une composante fréquente, mais généralement mineure de la fusariose de l'épi du maïs en Europe et en Amérique du Nord (Desjardins, 2006).

La diversité et la prédominance des espèces de *Fusarium* dépendent des conditions climatiques (température et précipitations) et des régions géographiques. Par exemple, *F. sporotrichioides* est adapté aux climats froids alors que *F. verticillioides* est plus répandue dans les climats chauds et secs, et *F. graminearum* est davantage associé aux conditions chaudes et humides (Bottalico et Perrone, 2002; Desjardins, 2006; Xu et coll., 2008). Par ailleurs, les variations climatiques observées annuellement peuvent affecter la fréquence de distribution des espèces de *Fusarium*. Une étude effectuée aux Pays-Bas a montré qu'en 1991, *F. culmorum* et *F. avenaceum* étaient les espèces plus répandues tandis qu'en 1993, *F. poae*, *F. culmorum* et *F. crookwellense* avaient été identifiés comme les espèces prédominantes de fusariose chez les céréales (Leonard et Bushnell, 2003). En Europe, la fusariose de l'épi et du grain est souvent causée par *F. proliferatum* tandis qu'en Amérique du Nord, *F. verticillioides* est l'espèce prédominante de cette maladie (Bottalico et Perrone, 2002 ; Desjardins, 2006).

2.2.2 Signes et symptômes visuels

Les symptômes de cette maladie correspondent à une moisissure blanche à rose ou de couleur saumon sur les grains infectés qui sont répartis au hasard sur l'épi (Bailey et coll., 2004; MAAARO, 2009; Mesterházy et coll., 2012). Il arrive que l'on observe des grains infectés par des symptômes visuels en forme d'étoile dont les stries irradient à partir du point d'attachement des soies jusqu'aux grains. De plus, les spathes deviennent délavées et adhèrent étroitement aux grains. On remarque également la présence de périthèces noirs sur les spathes plus tard en saison (Bailey et coll., 2004). Dans la majorité des cas, le degré de contamination de la mycotoxine est proportionnel à la gravité de l'infection visuelle. Néanmoins, la présence de mycotoxines a déjà aussi été rapportée lors d'une infection asymptomatique des grains (Mesterházy et coll., 2012).

2.2.3 Épidémiologie

Parmi les deux maladies mentionnées, le cycle épidémiologique de la fusariose de l'épi et du grain est le moins étudié (Munkvold, 2003b). L'espèce *F. verticillioides* peut envahir le maïs selon deux voies possibles : 1) l'infection des soies et des parties blessées par les conidies qui sont produites sur les résidus et dispersées par le vent et les éclaboussures causées par la pluie; 2) par les insectes comme vecteurs des conidies.

2.2.3.1 Sources d'inoculum et dispersion

L'inoculum primaire de *F. verticillioides*, de *F. subglutinans* et de *F. proliferatum* est constitué de nombreuses spores asexuées (des macroconidies et des microconidies) (Munkvold, 2003b). Les microconidies sont considérées comme les propagules les plus répandues chez la fusariose de l'épi et du grain. Elles sont transportées principalement par le vent et sont retrouvées facilement dans l'air à l'intérieur des champs de maïs, ces microconidies proviennent de champs de maïs plus éloignés (Munkvold, 2003b). D'après Ooka et Kommedahl (1977), les microconidies sont capables d'être dispersées à des distances aussi grandes que 300 à 400 km. Il faut également mentionner que la pluie et les insectes facilitent la dispersion de ce type de spores.

Les insectes jouent un rôle important comme vecteur de la dispersion des espèces de *F. verticillioides*, *F. proliferatum* et *F. subglutinans* mais un rôle moins important sur la dispersion des agents pathogènes de la fusariose de l'épi provenant de *F. graminearum* (Munkvold, 2003b). Ainsi, les insectes en produisant des blessures sur les plantes peuvent augmenter l'infection par *Fusarium spp.* (Parsons et Munkvold, 2010). Parmi les insectes ravageurs du maïs, la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*), les nitidulidaes (*Carpophilus spp.* et *Glischrochilus quadrisignatus*), les thrips des petits fruits (*Frankliniella occidentalis*), la chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica spp.*), certaines espèces de lépidoptères et de coléoptères favorisent la dispersion de cette maladie du maïs (Gilbertson et coll., 1986; Dowd, 1998; Cardwell et coll., 2000). Des spores de *F. verticillioides*, présentes sur la surface des feuilles, collent aux larves de la pyrale du maïs et sont transportées par celles-ci (Sobek et Munkvold, 1999). Les nitidulidaes et les chrysomèles adultes peuvent transporter les spores de *F. graminearum* et de *F. verticillioides*. Les nitidulidaes sont attirés par les épis de maïs qui ont été endommagés par des insectes tels que la pyrale du maïs et le ver de

l'épi du maïs. Les chrysomèles des racines se nourrissent de soies de maïs sur lesquelles les spores de *Fusarium spp.* peuvent causer l'infection. De plus, l'étude effectuée par Bartelt et Wicklow (1999) a démontré que ces insectes sont attirés par les composés organiques volatils produits par *F. verticillioides*. De plus, Schulthess et coll. (2002) ont rapporté que plusieurs espèces de lépidoptères et coléoptères étaient plus nombreuses sur les plantes inoculées par *F. verticillioides* que sur les plantes témoins non inoculées. Par conséquent, les coléoptères se trouvant sur une plante infestée pourraient transporter des spores de *Fusarium* et les livrer sur des grains blessés qui sont très sensibles à l'infection (Munkvold, 2003b).

2.2.3.2 Processus d'infection

Des lésions des grains causées par des insectes, plus précisément par *O. nubilalis* Hbn., sont la voie principale de l'infection pour *F. verticillioides* et probablement pour *F. proliferatum* et *F. subglutinans* (Bakan et coll., 2002; Alma et coll., 2005). Cependant, en absence de blessures, l'infection de la maladie se fera via les soies (Munkvold, 2003b). La pyrale du maïs peut déclencher l'infection selon deux voies possibles. Des larves peuvent agir comme des vecteurs endogènes ou exogènes en portant directement le champignon à l'intérieur des grains alors que l'autre voie d'infection est réalisée via des lésions causées par des larves quand elles mangent le péricarpe, ce qui crée une voie d'entrée du champignon (Sobek et Munkvold, 1999). Par ailleurs, une recherche effectuée par de la Campa et coll. (2005) a démontré que la sensibilité des hybrides aux lésions causées par des insectes est variable et qu'il existe une interaction significative entre la sensibilité des hybrides sensibles aux blessures et le contenu de la toxine fumonisine.

Il faut mentionner qu'un niveau relativement élevé d'humidité (précipitations fréquentes ou irrigations), pendant les deux périodes critiques, associé à des températures modérées à chaudes favorisent le développement de la fusariose de l'épi et de la fusariose de l'épi et du grain (Sutton, 1982; Reid et coll. 1996; Wu et coll., 2004; Blandino et Reyneri, 2010). Lorsque l'humidité des grains est inférieure ou égale à 22 -23 %, la croissance fongique est arrêtée. Néanmoins, lorsque l'humidité de l'épi est de 15 à 25 % plus élevée que l'humidité des grains, l'infection peut se propager dans les épis et infecter les plus jeunes grains via le pédicelle (Mesterházy et coll., 2012). La température optimale pour le développement de la

fusariose de l'épi se situe entre 26 et 28°C tandis que le développement de la fusariose de l'épi et du grain dépend d'une plus large gamme de températures élevées (Reid et coll., 1999). Enfin, il est possible que le taux d'infection causée par les insectes soit lié à l'augmentation de température.

2.3 Mycotoxines

Tel que mentionné dans la première partie de ce chapitre, les principaux facteurs des pertes économiques causées par la fusariose sont une baisse de rendement en grains et la présence de mycotoxines dans les grains (Bailey et coll., 2004). Les mycotoxines ont beaucoup de conséquences économiques et commerciales tant régionales qu'internationales, parce qu'elles affectent les élevages et la santé des humains (Wu et coll., 2004; Bryden, 2007; Wild, 2007; Wild et Gong, 2010). Différents facteurs ont un impact majeur sur la production des mycotoxines : les conditions climatiques et saisonnières, les différentes pratiques culturelles, l'entreposage et le transport des grains (Bhatnagar et coll., 2002).

Les mycotoxines sont des substances produites naturellement par des champignons. Elles sont considérées comme des métabolites secondaires puisqu'elles ne sont pas nécessaires à la croissance du champignon (Bhatnagar et coll., 2002; Bryden, 2012). Ces substances peuvent être toxiques pour les humains et les animaux qui en consomment une certaine quantité. Plusieurs familles de mycotoxines sont produites par de nombreux champignons et les trois genres *Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium* comprennent le plus grand nombre d'espèces produisant des mycotoxines, en particulier dans les céréales (Miller, 1998; Bhatnagar et coll., 2002). *Fusarium* est un genre très vaste et ses nombreuses espèces se retrouvent dans une grande variété d'habitats à travers le monde, dont un groupe de champignons phytopathogènes des cultures céréaliers (Flannigan, 1991; Miller, 1998). Selon une étude effectuée en 2005, le nombre d'espèces de *Fusarium* qui produisent des toxines a été estimé à plus de quarante (Desjardins, 2006). Les principales toxines produites par le genre *Fusarium* chez le maïs grain sont les trichothécènes, la zéaralénone et les fumonisines (D'Mello et coll., 1997; Miller, 1998; Miller, 2008).

Le degré de nuisibilité des mycotoxines sur l'humain et les animaux dépend d'une part du degré de toxicité de la mycotoxine, de la quantité de mycotoxines ingérée et des effets

synergiques avec d'autres composés présents dans l'alimentation, et d'autre part, de l'âge et de l'état de santé et nutritionnel de l'humain ou de l'animal (Bhatnagar et coll., 2002). De façon générale, les ruminants et les volailles sont relativement tolérants aux mycotoxines tandis que l'humain et les animaux monogastriques comme le porc sont les plus sensibles (Prelusky et coll., 1994). Le tableau 1 présente les concentrations maximales de mycotoxines pour l'alimentation humaine et admissibles pour la ration totale de l'animal, par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA).

Tableau 1. Concentrations maximales en ppm de mycotoxines admissibles ou décrétées par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA)

Mycotoxines	DON	ZEN	T2	FUM ^a
Alimentation humaine	2	-	-	2
Porcs	1	0,25	1	10
Volaille	5	-	1	15
Bovins	5	-	1	30
Vaches laitières	1	1,5	-	-

^aPour la fumonisine, aucun seuil n'est défini au Canada. La valeur indiquée dans ce tableau correspond à celle des États-Unis.

Source: adapté de l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA).

2.3.1 Trichothécènes

Les trichothécènes consistent en une grande famille de mycotoxines avec plus de 60 métabolites sesquiterpénoïdes produits par un certain nombre de genres fongiques, y compris *Fusarium*, *Myrothecium*, *Phomopsis*, *Stachybotrys*, *Trichoderma*, *Trichothecium* etc. (Cole et Cox, 1981; Scott, 1989). Ils sont divisés en quatre groupes principaux, avec des types A et B représentant les composés les plus importants. Le type A comprend les toxines T2, HT2, néosolaniol (NEO), diacétoxyscirpénol (DAS), alors que le type B correspond au désoxynivalénol (DON) et ses dérivés 3-ADON, 15-ADON et fusarénone-X (Placinta et coll., 1999). Les trichothécènes les plus préoccupants pour la nourriture et la consommation d'aliments sont le DON et la T2 chez le maïs-grain (Bhatnagar et coll., 2002).

2.3.1.1 Désoxynivalénol

Le désoxynivalénol (DON) est l'une des mycotoxines des plus répandues et se trouve couramment dans le maïs, bien qu'il soit moins toxique que d'autres trichothécènes majeurs (Miller et coll., 2001; Kumar et coll., 2008). Aux États-Unis, en 1965 et 1972, le *F.*

graminearum a causé de graves épidémies de fusariose de l'épi chez le maïs. Les agriculteurs qui avaient alors utilisé des céréales contaminées pour l'alimentation des porcs ont signalé des vomissements et des refus de s'alimenter (Tuite et coll., 1974). Parmi les mycotoxines qui ont été isolées de ces maïs contaminés on retrouvait le désoxynivalénol. Cependant, il y a eu d'autres rapports qui ont confirmé le rôle virulent de *F. graminearum* en produisant la toxine DON chez d'autres céréales (Desjardins, 2006).

Les symptômes observés généralement chez les animaux d'élevage sont: une diminution de la prise alimentaire, une diminution de la performance alimentaire associée à des vomissements, la diarrhée et parfois la mort à des doses plus élevées. Par ailleurs, à des doses plus faibles de DON, une perte de poids et le refus de se nourrir ont également été rapportés chez les porcs et chez d'autres animaux de ferme (Rotter, 1996). Le vomissement est le symptôme pour lequel le désoxynivalénol est souvent appelé vomitoxine (Kumar et coll., 2008).

2.3.1.2 T2

Au cours de la Seconde Guerre mondiale, des milliers de personnes ont été affectées par la maladie de l'aleukia toxique alimentaire (ATA) (Mirocha, 1984; Beardall et coll., 1994). Des études effectuées sur cette maladie ont démontré que les grains humides qui avaient été laissés au champ au cours de l'hiver, puis récoltés au printemps avaient causé l'épidémie ATA (Desjardins, 2006; Miller, 2008). Deux agents pathogènes principaux de l'ATA, *F. sporotrichioides* et *F. poae*, produisent fréquemment la toxine T2 (Desjardins, 2006).

Contrairement à la majorité des mycotoxines, la température optimale pour produire la T2 est de 15°C au lieu de 25 à 30°C pour d'autres toxines (Bhatnagar et coll., 2002). Donc, si des grains sont récoltés dans des conditions chaudes et sèches, les données de fréquence montrent souvent un contenu plus basse de toxine T2 (Miller, 2008). Cependant, la toxicité de T2 est plus élevée que celle de la toxine DON. Toutefois, les symptômes visuels des impacts du DON et de la T2 sont similaires chez les animaux (Prelusky et coll., 1994). En plus, il est rapporté des troubles de la reproduction chez les truies par cette toxine (Placinta et coll., 1999).

2.3.2 Zéaralénone

Durant la décennie 1960, une substance oestrogénique a été isolée de cultures de *F. graminearum* qui avait causé des symptômes oestrogéniques chez la souris (Miller, 1995). Ce composé oestrogénique et non stéroïdien a été caractérisé et nommé Zéaralénone (ZEN) (Urry et coll., 1966). Parmi les mycotoxines de *Fusarium*, la ZEN est plus largement distribuée dans les produits agricoles et se retrouve souvent à des concentrations relativement élevées, en particulier dans le maïs (Logrieco et coll., 2003). De nombreuses espèces de *Fusarium* ont la capacité de synthétiser la ZEN qui se retrouve souvent avec certaines toxines trichothécènes (Placinta et coll., 1999). Le *F. graminearum* est la principale espèce productrice de ZEN chez le maïs-grain en Amérique du Nord (Logrieco et coll., 2002).

Les porcs sont très sensibles à la zéaralénone, alors que les volailles sont plutôt tolérantes (Bryden, 2012). Chez les porcs, une concentration variant de moins de 0,1 ppm jusqu'à 5 ppm de ZEN dans une ration alimentaire peut provoquer le syndrome oestrogénique. Chez les femelles, les symptômes incluent l'élargissement de la glande mammaire et des organes de l'appareil génital, l'atrophie génitale des ovaires, l'infertilité, la taille réduite de la portée, la réduction du poids des porcelets et l'augmentation de l'incidence de cancer du col de l'utérus (Bhatnagar et coll., 2002; Desjardins, 2006). Chez les mâles, les symptômes incluent une hypertrophie des glandes mammaires et une atrophie des testicules (Desjardins, 2006). En revanche, les ruminants sont moins sensibles à la ZEN et un dérivé de cette toxine, le Zéranol, est utilisé dans certains pays, comme stimulateur de croissance pour les moutons et les bovins (Baldwin et coll., 1983; Weaver et coll., 1986).

La zéaralénone est également toxique pour les plantes; à de faibles concentrations, elle pourrait inhiber la germination des graines et la croissance des embryons (Bhatnagar et coll., 2002). En 1993, la cancérogénicité de la ZEN a été définie probable, mais cette toxine n'est pas été classifiée comme cancérogène pour l'homme (Miller, 1995; Logrieco et coll., 2003). Donc, les résidus de ZEN dans la viande, le lait ou les œufs ne semblent pas constituer un problème important (Prelusky et coll., 1994).

2.3.3 Fumonisines

Les toxines fumonisines (FUM) ont été découvertes et caractérisées en 1988 (Bezuidenhout et coll., 1988). Elles sont produites par un certain nombre d'espèces de *Fusarium*, en particulier par *F. verticillioides*, *F. proliferatum* et *F. subglutinans* qui sont retrouvés dans les régions tempérées du monde entier (Munkvold et Desjardins, 1997; Bailey et coll., 2004). Ces espèces peuvent infecter une grande variété de plantes cultivées et parmi elles, le maïs a été identifié comme la source principale de FUM chez les humains et les animaux (Desjardins, 2006). Les fumonisines peuvent contaminer les grains dans le champ lorsque les conditions environnementales sont favorables pour les infections fongiques et les concentrations de la toxine pourraient augmenter considérablement si les conditions de l'entreposage sont favorables à la croissance fongique et à la production de fumonisines.

Dans le groupe de fumonisines, le type de fumonidine B₁ (FB₁) est prédominant et le plus abondamment produit de ce groupe (Kumar et coll., 2008). Une étude réalisée en Ontario en 1993, a fourni des preuves que les niveaux de fumonidine dans le maïs sont relativement faibles au Canada (Miller, 1995). Dans cette étude, les deux types de fumonisines B₁ et B₂ étaient présents uniquement dans 10 % des échantillons à des niveaux supérieurs à la limite de détection de 0,4 ppm. Le niveau maximal de ces toxines n'était que de 2,5 ppm (Desjardins, 2006).

Les fumonisines affectent les animaux de différentes façons et interfèrent avec le métabolisme des sphingolipides (Merrill et coll., 2001). Elles causent des maladies mortelles en particulier la leucoencéphalomalacie et l'œdème pulmonaire respectivement chez les chevaux et chez les porcs (Desjardins, 2006).

2.3.4 Méthodes pour le dosage des mycotoxines

Différentes méthodes sont appliquées pour le dosage des mycotoxines. Une des méthodes est la chromatographie. Celle-ci comprend trois sous-groupes; la chromatographie sur couche mince (Thin layer chromatography: TLC), la chromatographie en phase gazeuse (Gas chromatography: GC) et la chromatographie à haute performance (High performance thin layer chromatography: HPLC). Les autres méthodes d'évaluation ou de dosage des mycotoxines sont les bioessais, la méthode visuelle, l'ELISA, la fluorométrie et le proche

infrarouge. La méthode visuelle consiste à évaluer le nombre de grains avariés. Grâce aux bioessais, il est possible de détecter et de mesurer la toxicité des extraits d'organismes vivants; cependant, il n'est pas possible d'identifier les toxines (Schaafsma et coll., 2004; Savard et Durivage, 2009).

Les méthodes chromatographiques sont basées sur la séparation des composantes par une migration différentielle dans un milieu. Pour la TLC, la substance est déposée au bas d'une plaque et celle-ci est déposée dans un peu d'éluant. L'éluant et les composantes de la substance montent sur la plaque par capillarité et puisque les vitesses des composantes sont variables, il est possible de distinguer les produits. Les méthodes des bioessais, de l'évaluation visuelle et du TLC sont connues comme les plus vieilles méthodes. Bien que les méthodes des bioessais et du TLC ne soient pas dispendieuses, elles sont plus lentes et sans précision. De même, l'évaluation visuelle est rapide et moins chère mais sans précision (Schaafsma et coll., 2004; Savard et Durivage, 2009).

Quant à la méthode par GC, un gaz a été remplacé au lieu d'un éluant au travers d'un tube contenant un adsorbant. Le point d'ébullition des produits analysés a un grand effet sur le temps de rétention. Pour le HPLC, c'est le même principe, sauf que l'élution se fait à l'aide d'un liquide sous haute pression, et le facteur déterminant de cette méthode est la polarité des substances. Les produits élués par les méthodes de GC et de HPLC sont détectés de façon quantitative par divers moyens, mais ces méthodes ont leurs limitations. Elles nécessitent beaucoup de manipulations, de nettoyage des échantillons, et l'utilisation d'un spectromètre de masse ou d'un spectrophotomètre à balayage. Par conséquent, bien que ces deux méthodes possèdent la meilleure précision, elles prennent plus de temps et sont chères (Sinha et Savard, 1996; Savard et Durivage, 2009).

Le principe de la méthode par fluorométrie est le même que celui utilisé pour le GC et le HPLC. Toutefois, puisqu'il y a deux types d'instruments, cela signifie qu'on peut évaluer la fluorescence de la toxine ou de la toxine modifiée avec une étiquette fluorescente. Cette méthode est classée moyenne au point de vue des aspects du coût, de la précision et de la vitesse (Savard et Durivage, 2009).

Finalement, la méthode de l'ELISA (Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay) est présentement la méthode la plus rapide pour mesurer la concentration des mycotoxines

puisque l'on peut analyser près d'une cinquantaine d'échantillons en même temps. De plus, cette méthode a une précision adéquate et un prix modéré. L'ELISA est basée sur le pouvoir du système immunitaire animal de produire des anticorps aux toxines qu'on veut analyser. Les anticorps sont très sélectifs et ne réagissent qu'avec la toxine visée (Sinha et Savard, 1996).

En fait, cette méthode consiste en une compétition entre la toxine dans l'extrait et la même toxine attachée à un enzyme. Cet enzyme est la peroxydase de raifort (PR). Lorsqu'un équilibre est réalisé entre ces deux molécules, la quantité de toxine attachée à l'enzyme est mesurée par le peroxyde et un substrat de l'enzyme ajouté qui produit une couleur. Donc, l'intensité de la couleur peut être mesurée par un spectrophotomètre. Cette intensité est directement liée à la concentration de l'enzyme et inversement proportionnelle à la concentration en toxine (Sinha et Savard, 1996).

2.4 Moyens de lutte

Certaines études ont identifié différents éléments des pratiques culturales qui pourraient contribuer à réduire la fusariose : le choix d'un hybride plus tolérant ou résistant, la rotation des cultures, le travail du sol, l'application de fongicides, les dates de semis et de récolte. Selon Hooker et Schaafsma (2005), les facteurs année (climat et emplacement géographique) et hybride ont le plus grand impact sur la concentration en DON et en fumonisine B₁ (FB₁). De plus, selon leur étude, l'effet du précédent cultural contribuait pour 9 à 18 % de la variance de l'accumulation en DON et de 9 % pour le FB₁ dans le maïs-grain. Cependant, d'autres pratiques culturales comme le travail du sol ou la fertilisation azotée n'avaient pas un grand effet sur les deux toxines évaluées.

2.4.1 Choix des hybrides

D'après Schaafsma et coll. (2006) la sélection des hybrides résistants à *F. graminearum* pourrait aider à réduire le risque d'accumulation de mycotoxines chez le maïs-grain. Bien que les hybrides sensibles ou très sensibles aient généralement été éliminés par la sélection génétique au cours du processus d'amélioration (Munkvold, 2003a), il existe encore très peu d'hybrides résistants à la fusariose de l'épi (causée par *Fusarium graminearum*) et à la fusariose de l'épi et du grain (causée par *Fusarium verticillioides*) et aucun hybride ne

possède une résistance qui soit jugée satisfaisante (Hooker et Schaafsma, 2005; Mesterházy et coll., 2012).

Les nouveaux règlements promulgués par plusieurs pays relativement aux limites permises des contenus en mycotoxines devraient renforcer le développement de la résistance à la fusariose des programmes d'amélioration génétique existants. Les futurs hybrides devraient aussi posséder une meilleure résistance aux champignons. Il est aussi souhaitable que les producteurs aient accès aux données de notation de fusariose des hybrides afin qu'ils puissent choisir des hybrides plus résistants (Mesterházy et coll., 2012).

L'étude de huit années de Hooker et Schaafsma (2005) réalisée à partir de 856 champs de maïs situés en Ontario a démontré que parmi toutes les variables agronomiques étudiées (travail du sol, rotation de culture, etc.), l'effet hybride avait la plus grande influence sur l'accumulation en DON et FB₁. En effet, 25 % de la variance des deux toxines pour l'ensemble des années était expliquée par l'effet hybride ($P < 0,0001$). L'effet année (ce qui correspond probablement à la météo) suivait avec 12 % de la variance pour le DON et 19 % pour la FB₁ et correspondait au deuxième effet le plus important pour ces deux mycotoxines ($P < 0,0001$). L'interaction Hybride \times Année était significative ($P < 0,0001$) pour les deux toxines mesurées et représentait 42 % de la variance. D'autres études réalisées en Argentine et aux Philippines sur différents hybrides de maïs-grain ont démontré que 47 % de la variance de FUM était expliqué par l'effet site (l'effet météorologique), 17 % par la gravité des blessures d'insectes et 14 % par l'effet de l'hybride Bt (hybride avec des gènes de *Bacillus thuringiensis* et possédant des propriétés insecticides) (de la Campa et coll., 2005). Les résultats de ces deux études ont donc démontré que l'effet année ou site (les conditions météorologiques) et l'effet hybride avaient de grandes influences sur le contenu des mycotoxines DON et FUM.

Étant donné que la période de l'infection par *F. graminearum* pendant la maturation est plus longue pour les hybrides tardifs que pour les hybrides hâtifs, certains auteurs ont prédit que l'hybride tardif aurait plus de toxine DON que l'hybride hâtif (Reid et Sinha, 1998). Toutefois, les résultats de cette étude n'ont pas démontré d'effet de la maturité sur l'accumulation en DON des cinq hybrides évalués possédant différentes maturités physiologiques (hâtif, moyen, tardif). Selon ces auteurs, le résultat obtenu était causé par les

températures optimales de croissance fongique, lesquelles ont graduellement diminué au cours du mois d'août. D'autres études réalisées sur l'effet de la maturité sur l'accumulation de la ZEN et de la FUM ont montré que la ZEN pourrait considérablement diminuer chez les hybrides hâtifs et diminuer dans une moindre mesure (moins de 30 %) chez les hybrides tardifs. La variation du contenu en ZEN était significative entre les hybrides pour les années 2001 et 2002. Par exemple, en 2002, la concentration en toxines de chacun des hybrides (tardif, moyen et hâtif) était différente et la concentration de l'hybride tardif (173 ppb) était plus élevée par rapport aux hybrides classés moyen (102 ppb) et hâtif (63 ppb). Par contre, la variation de la concentration en FB_1 était seulement significative en 2001, avec une concentration chez les hybrides tardifs (4410 ppb) par rapport aux hybrides hâtifs (2179 ppb) et moyens (2082 ppb). L'effet de la maturité n'a cependant pas été significatif sur la concentration en FUM (Blandino et Reyneri, 2010).

La venue du maïs transgénique pourrait être considérée comme une alternative ou un complément à l'amélioration de la résistance aux maladies. L'utilisation de maïs transgénique permet d'augmenter la résistance aux insectes (*Ostrinia nubilalis*, *Diatraea grandiosella*, *Diabrotica virgifera virgifera*, *Helicoverpa zea* et *Frankliniella spp.*) et les pratiques culturelles proposées permettent un meilleur contrôle de *Fusarium spp.* (Archer et coll., 2001; Parsons et Munkvold, 2010). Plusieurs études récentes ont montré que les maïs transgéniques de type Bt ont considérablement fait diminuer les contenus en DON, en FUM ainsi que par d'autres toxines (Munkvold et coll., 1997; Dowd, 2001; de la Campa et coll., 2005, Papst et coll., 2005; Wu, 2006). Selon Munkvold (2003a), la fusariose de l'épi n'est pas étroitement liée aux blessures des insectes et ses mycotoxines (DON, ZEN) ne sont pas également influencées par l'utilisation d'un hybride Bt. Par contre, les expériences de Magg et coll. (2002) et de Schaafsma et coll., (2002) expériences réalisées respectivement en Allemagne et au Canada, ont montré qu'un hybride Bt pouvait réduire faiblement mais significativement le contenu en DON. Dans l'étude Schaafsma et coll., (2002), les concentrations de DON et de FB_1 ont été évaluées sur 102 hybrides commerciaux Bt et non-Bt. Puisque la concentration moyenne de FB_1 était négligeable (moins de 0,25 ppm) et souvent en dessous de la limite inférieure de détection (moins de 0,1 ppm) dans la plupart des champs, la relation entre le contenu en FB_1 et l'intensité de la pyrale du maïs ou l'utilisation de l'hybride Bt n'a pas été déterminé. Le DON était la toxine la plus fréquente

(de 0,42 ppm en 1997 à 1,12 ppm en 1999) et l'effet de l'hybride Bt sur la réduction du contenu en DON a principalement été lié à l'intensité de la pyrale du maïs dans chaque champ. Lors d'une forte intensité d'*O. nubilalis* (plus de 4 cm de tunnel par tige dans le non-Bt), l'utilisation d'un hybride Bt a réduit la concentration de DON en moyenne de 59 % par rapport au non-Bt. Par contre, quand l'intensité de la pyrale du maïs était basse (moins de 4 cm de tunnel par tige dans le non-Bt), aucune différence n'a été observée entre la concentration de DON des hybrides Bt et celle des hybrides non-Bt (Schaafsma et coll., 2002).

Les études réalisées sur l'effet de l'hybride ont généralement été réalisées sur la production de la fusariose de l'épi, de la fusariose de l'épi et du grain et sur le développement des toxines DON et FUM. Les expériences sur d'autres toxines comme la ZEN et le T2 sont rares.

2.4.2 Rotation des cultures

D'après Beyer et coll. (2006), le précédent cultural pourrait favoriser l'épidémie de fusariose de l'épi chez la culture suivante par deux mécanismes. D'abord, si le précédent cultural était une des plantes hôtes des espèces de *Fusarium*, il peut augmenter la production d'inoculum et par conséquent le risque d'infection par rapport aux plantes non-hôtes. Par exemple, dans les travaux de Dill-Macky et Jones (2000), l'effet de trois précédents culturaux (maïs, blé et soya) a été étudié sur la culture de blé. Le pourcentage d'épis fusariés du blé était de 75 %, 67 % et 64 %; l'intensité de la maladie sur les épis infectés était 23 %, 18 % et 16 %, et les niveaux de DON, 13,5, 9,2 et 6,9 ppm, lorsque le précédent cultural était le maïs, le blé et le soya, respectivement. De plus, quatre années d'études réalisées par Schaafsma et coll. (2001) sur le blé a également confirmé que le contenu en DON chez le blé était plus élevé lorsque le précédent cultural était du maïs plutôt que du soya ou du blé. Cependant, il n'est pas encore évident que lorsque le blé suit le blé, il y ait plus de risque que lorsque le blé suit d'autres cultures (Jouany, 2007). Le précédent cultural peut produire de grandes quantités de résidus de culture appropriés pour la survie des espèces de *Fusarium*. Le maïs-grain est défini comme le précédent cultural le plus favorable et le plus risqué pour entraîner une épidémie de fusariose de l'épi et une contamination par le DON (Beyer et coll., 2006; Jouany, 2007). De plus, les techniques

actuelles de récolte de maïs et de travail superficiel du sol visant la conservation des sols entraînent une plus grande quantité de débris qui restent à la surface du sol (Beyer et coll., 2006). Dans l'étude de huit ans de Hooker et Schaafsma (2005) sur le maïs grain, les auteurs ont observé que le semis de maïs après le blé ou de deux ans après le maïs pouvait augmenter les contenus en DON et FB₁. Alors, il est probablement nécessaire de semer des hybrides de maïs qui soient plus résistants à l'accumulation de mycotoxines, ou d'utiliser des hybrides Bt après le blé ou après le maïs. De plus, il est souhaitable de cultiver des plantes non hôtes, par exemple la betterave sucrière, le lin, la luzerne ou le soya dans la rotation des cultures afin de limiter la maladie (Champeil et coll., 2004).

2.4.3 Travail du sol

Étant donné que les résidus de culture laissés à la surface du sol contribuent à la production de l'inoculum primaire de *Fusarium*, il est probable que différentes techniques de travail du sol influencent la couverture de résidus, la fréquence de cette maladie et conséquemment le contenu en mycotoxines. Les trois principaux types de travail du sol sont le travail conventionnel, le travail réduit du sol et le semis direct.

Parmi les trois types mentionnés, le travail conventionnel est la méthode la plus efficace pour l'élimination des résidus colonisés par des espèces de *Fusarium*. Cette méthode comprend un labour en profondeur qui inverse complètement le sol entre 10 et 30 cm et enfouit les résidus organiques de la récolte précédente (Beyer et coll., 2006; Jouany, 2007). Selon différentes études effectuées, la fréquence et la sévérité de la fusariose de l'épi et le contenu en DON diminuent lorsque les résidus sont enfouis par un labour et en particulier lorsque le précédent cultural est une espèce hôte par rapport au deux autres travaux du sol (Miller et coll., 1998; Dill-Macky et Jones, 2000; Champeil et coll., 2004; Steinkellner et Langer, 2004; Rioux et coll., 2005; Schaafsma et coll., 2005; Koch et coll., 2006). Par exemple, une étude menée par Mansfield et coll. (2005) a confirmé que le travail du sol a un effet significatif ($P = 0,031$) sur la concentration en DON chez le maïs grain. La concentration moyenne en DON est plus élevée avec le semis direct (2,4 ppm) ou avec un travail réduit (1,7 ppm) qu'avec un travail conventionnel (0,6 ppm) ou un travail mixte (1,1 ppm). La fréquence de la fusariose de l'épi du blé était significativement moindre sous travail conventionnel (63,5 %), comparativement au travail réduit (71,8 %) ou au semis

direct (70,8 %); la sévérité de la maladie était aussi moindre sous travail conventionnel (15,6 %), comparativement aux deux autres types travail du sol (travail réduit 20,3 % et semis direct 21,3 %). Lorsque le travail du sol était un travail conventionnel (8,1 ppm), la concentration en DON était significativement moindre qu'en travail réduit (10,6 ppm) ou en semis direct (11,1 ppm) (Dill-Macky et Jones, 2000). Une étude réalisée par Khonga et Sutton (1988) a démontré qu'il n'y a plus de périthèces ni de sporodochies de *G. zaeae* sur les résidus enfouis dès la deuxième année de l'expérimentation. Cependant, le groupe de recherche de Pereyra et coll. (2004) a observé que les résidus enfouis pouvaient encore produire des ascospores au bout de deux années, quoiqu'en quantité plus faible. Mais ils ont confirmé que les résidus enfouis contiennent de la lignine qui est défavorable à la croissance et à la conservation de *G. zaeae* (Pereyra et coll., 2004). La production de périthèces, d'ascospores et de macroconidies dans les résidus enfouis est plus faible comparativement à celle des résidus laissés à la surface du sol (Khonga et Sutton, 1988). Bien que le travail conventionnel puisse réduire la production des espèces de *Fusarium* de façon considérable, il faut faire attention de ne pas remonter les résidus enfouis à la surface, puisque *G. zaeae* aurait encore la possibilité de produire des spores lorsque les conditions climatiques deviennent favorables (Inch et Gilbert, 2003; Pereyra et coll., 2004).

Le travail réduit du sol limite aussi l'érosion éolienne et hydrique. Il est souvent réalisé à l'aide d'un chisel ou d'une herse à disques. Cette technique entraîne une incorporation incomplète des résidus de culture à une profondeur de 10 à 20 cm dans le sol (Jouany, 2007). D'après Obst et coll. (1997), le travail réduit augmenterait de 10 fois le contenu en DON chez le blé suivant du blé par rapport au travail conventionnel. De plus, dans une autre étude faite sur le blé, la moyenne de l'indice de fusariose était significativement plus élevée sous un travail réduit (4,21 %) par rapport au travail conventionnel (2,99 %) et au semis direct (2,10 %) (Fernandez et coll., 2007). Finalement, selon Steinkellner et Langer (2004), l'utilisation du travail réduit, comparativement à l'utilisation du travail conventionnel, peut également favoriser une plus grande quantité d'humus en surface et ainsi activer un plus grand nombre de microbes, ce qui augmenterait l'incidence et la diversité de plusieurs espèces de *Fusarium* dans le sol. Bien que, dans ce cas, la diversité et le nombre de propagules (en particulier de *F. graminearum*) aient été influencés par le travail réduit, le contenu en DON des grains ne changeait pas.

En semis direct, il n'y a aucun travail de sol. À l'aide d'un semoir spécialisé, les semences sont enfouies dans le sol en écartant ou non les résidus de culture (Jouany, 2007). Par conséquent, cette méthode laisse beaucoup de résidus de culture sur le sol comparativement aux deux autres méthodes. Plusieurs études ont été effectuées sur les effets du travail réduit et du semis direct sur la fusariose de l'épi, et les résultats sont très variés. Par exemple, les travaux de Dill-Macky et Jones (2000) ont rapporté qu'aucune différence du contenu en DON des grains, de l'incidence et de la gravité de la fusariose de l'épi du blé n'existe entre le travail réduit et le semis direct. Selon cette étude, la densité et la stratification des résidus dans les parcelles de semis direct pouvaient probablement influencer de façon négative le microclimat et la sporulation de *F. graminearum* en réduisant le contact des résidus avec le sol. Dans certaines études, la fusariose de l'épi du blé n'a été influencée par aucune pratique de travail du sol (Miller et coll., 1998; Schaafsma et coll., 2001). D'après ces deux études, d'autres facteurs comme les cultures précédentes, les conditions météorologiques, la sensibilité des cultivars et la précédente apparition de cette maladie peuvent être plus importantes que l'effet du travail du sol. Cependant, en 1997, en présence d'une grande épidémie de fusariose en Ontario, les niveaux moyens de DON étaient plus élevés dans les systèmes de travail réduit du sol (1,3 ppm) qu'en travail du sol conventionnel (0,5 ppm) ou en semis direct (0,7 ppm) (Schaafsma et coll., 2001).

Certaines études ont révélé des interactions significatives entre le précédent cultural et le travail du sol sur la fusariose chez le blé (Dill-Macky et Jones, 2000; Del Ponte et coll., 2003; Schaafsma et coll., 2005). Par exemple, lors des travaux de Dill-Macky et Jones (2000), le contenu en DON chez le blé était significativement plus élevé avec un précédent cultural de maïs ou de blé sous chisel ou semis direct comparativement au labour. Le contenu en DON du blé qui a suivi le soya n'a toutefois pas varié avec les différents travaux du sol. Les résultats des études de Del Ponte et coll. (2003) dans l'État de New York, de Schaafsma et coll. (2005) en Ontario et de Rioux et coll. (2005) au Québec ont aussi démontré que la fusariose du blé est plus grave avec un précédent cultural de maïs et sous réduit qu'un précédent de soya sous travail conventionnel.

Une étude réalisée par Ariño et coll. (2009) démontre que la concentration en fumonisines a faiblement diminué avec un labour (490 ± 230 ppb) par rapport au chisel (534 ± 237 ppb)

mais la différence n'était pas significative ($P > 0,10$). En conséquence, le système de travail du sol n'a pas eu d'effet significatif sur l'incidence et le contenu en FUM chez le maïs-grain. Les auteurs ont avancé l'hypothèse que les résidus contaminés par *F. verticillioides* laissés en surface, ne sont pas nécessairement responsables de l'augmentation du contenu en FUM. Par contre, dans cette étude, l'effet de l'élimination des résidus de culture sur le contenu en FUM a été mesuré et une réduction significative de la concentration en mycotoxine (249 ± 216 ppb) a été rapportée par rapport aux champs dans lesquels les résidus de culture ont été incorporés dans le sol (683 ± 239 ppb).

2.4.4 Application de fongicides

Jusqu'à ce jour, de nombreux produits chimiques ont été évalués contre *Fusarium spp.* soit *in vitro*, en serre ou en champ, mais l'efficacité de ces traitements varie d'une étude à l'autre (Champeil et coll., 2004; Jouany, 2007). L'efficacité du fongicide dépend en général de la matière active, du mode d'action et de la date d'application du fongicide (Champeil et coll., 2004). Elle dépend également de l'interaction entre le développement fongique et le climat ainsi que de la virulence des souches de champignons pathogènes (Mesterházy et Bartok, 1996). De plus, un fongicide devrait causer la mort du champignon sinon, il pourrait stimuler la production de mycotoxines en conditions *in vitro* (Jouany, 2007).

Il n'existe pas beaucoup d'études consacrées à l'effet des fongicides sur la fusariose de l'épi et la fusariose de l'épi et du grain et leurs mycotoxines chez le maïs-grain. La majorité des précédentes études ont été réalisées pour connaître l'effet des fongicides sur la fusariose de l'épi du blé et ses mycotoxines, ou bien sur le rendement des céréales. C'est la raison pour laquelle, ici, on présente principalement l'effet de fongicides sur la fusariose du blé ainsi que quelques études limitées sur la fusariose du maïs-grain.

Les fongicides homologués contre les *Fusarium spp.* pour le blé sont le prothioconazole, le chlorothalonil, le tébuconazole, le metconazole, le *Bacillus subtilis* var. *amylolyquefaciens* (souche FZB24) et le metconazole avec pyraclostrobine (Sagepesticides.qc.ca, 2013). Une étude menée sur plus de 100 essais de fongicide pendant plus de 11 ans à partir de 14 stations différentes des États-Unis, a démontré que les fongicides avec une ou des matières actives de type triazole, comme le prothioconazole, le metconazole et le tébuconazole +

prothioconazole ont été identifiés comme les fongicides les plus efficaces contre la fusariose de l'épi du blé et la toxine DON (Paul et coll., 2008). Les fongicides évalués dans cette étude, ont réduit l'indice de fusariose (la fréquence \times la sévérité) de plus de 14 à 20 % et la concentration en DON de plus de 25 à 29 %. Dans d'autres études, l'application de fongicide contenant du prothioconazole au début de la floraison a fortement diminué la sévérité de la fusariose du blé (entre 39 et 93 %). En conséquence, le contenu en DON dans les grains a chuté considérablement (entre 40 et 91 %), et le rendement a augmenté de 0,4 à 5,6 t ha⁻¹ avec une moyenne de 2,2 t ha⁻¹ (Haidukowski et coll., 2012).

Le seul fongicide homologué contre les *Fusarium spp.* pour le maïs-grain est le prothioconazole (Sagepesticides.qc.ca, 2013). Dans une étude réalisée dans l'est du Canada sur le fongicide prothioconazole avec deux hybrides de maïs sensibles aux maladies, des réductions de 58 %, de 49 % et de 38 % du DON ont été observées par rapport au témoin non traité lorsque le prothioconazole a été pulvérisé respectivement au moment de l'apparition de floraison mâle, lors de la floraison femelle (apparition des soies) et cinq jours après l'apparition des soies (Limay-Rios et Schaafsma, 2010).

En Italie, l'application d'une combinaison du fongicide tébuconazole avec l'insecticide deltaméthrin sur les épis de maïs-grain a permis de mieux réduire la contamination de *F. verticillioides* et la production de FUM par rapport à l'application du fongicide seul. Dans ce cas, la FB₁ a varié de 6767 ppb dans la parcelle non traitée à 4429 ppb (-35 %, fongicide seul) et à 3013 ppb (-56 %, fongicide et insecticide) (Mazzoni et coll., 2011). En effet, une interaction entre le *F. verticillioides* et les parasites attaquant les grains de maïs a été constaté, en particulier la pyrale du maïs (*O. nubilalis*), qui favorise l'infection fongique par dommage des grains et par sa dispersion au cours du mouvement des larves (Dowd, 1998; Alma et coll., 2005).

L'utilisation de certains fongicides de type triazole pourrait stimuler la production de mycotoxines sous certaines conditions. Ainsi, l'augmentation de la dose de tridémorphe a influencé la production de T2 par *F. sporotrichioides* dans des conditions *in vitro*. À de faibles concentrations (6-8 µg ml⁻¹), la production de T2 a été réduite tandis que la croissance de *F. sporotrichioides* a augmenté. Aux concentrations supérieures de fongicide tridémorphe (30-50 µg ml⁻¹), la croissance du *F. sporotrichioides* a été inhibée par plus de

50 %, mais la production de T2 était cinq fois supérieure (Moss et Frank, 1985). De même, d'autres études *in vitro* sur différentes espèces de *F. culmorum* d'Europe ont montré une stimulation de la production de DON en présence de l'epoxiconazole et de propiconazole sur les grains de blé (Magan et coll., 2002).

Une autre classe de fongicides, les strobilurines, affichent des résultats variés. Certaines études ont révélé l'absence d'effet des strobilurines contre *F. graminearum*. Ces fongicides n'ont pas eu d'effet sur le rendement ainsi que sur le contenu en DON des grains du blé (Milus et Weight, 1998; Haidukowski et coll., 2005). Dans l'étude réalisée par Pirgozliev et coll. (2002), les effets de l'azoxystrobine et du metconazole contre le *F. graminearum* et le *F. culmorum* inoculés sur les épis du blé ont été évalués. Dans ce cas, les deux fongicides ont réduit de façon significative la concentration en DON par rapport aux plantes témoins. Cependant, lorsque la dose de l'azoxystrobine était égale ou supérieure aux demi-doses, il a réduit les concentrations de DON de 20 à 75 %, selon la souche utilisée de l'agent pathogène. Il n'y a pas eu d'effet direct sur le contenu en DON. En réduisant la concentration en DON par plus de 95 % le metconazole, s'est révélé plus efficace, lorsqu'il a été appliqué à des doses supérieures aux demi-doses, indépendamment de la souche utilisée. Selon Pirgozliev et coll. (2003), le ratio entre les champignons toxiques et non toxiques est changé lorsqu'un fongicide de type strobilurine est appliqué.

D'après Limay-Rios et Schaafsma (2010), l'application des fongicides foliaires de type strobilurines comme le Headline (pyraclostrobine) et le Quilt (azoxystrobine + propiconazole) pourraient accroître l'accumulation en DON d'environ 50 % et 15 % dans le maïs grain, respectivement. De plus, dans une autre étude réalisée par Blandino et coll. (2012), aucun effet significatif du fongicide foliaire Quilt (azoxystrobine + propiconazole) sur la sévérité de la pyrale du maïs, la sévérité de la fusariose de l'épi et du grain et sur le contenu en FB₁ et FB₂ n'a été observé.

Finalement, les études *in situ* et *in vitro* montrent que l'application de 50 $\mu\text{g ml}^{-1}$ du fongicide Maneb aux grains fusariés de blé par *F. graminearum* permettait de bien réduire la croissance fongique et la production de ZEN (Draughon et Churchville, 1985). Mais d'autres études effectuées par Hasan (1993) ont illustré que le dichloran, l'iprodione et le

vinclozoline (à $250\mu\text{gml}^{-1}$) ont pu inhiber la production de ZEN par *F. graminearum*. Par contre, $500\mu\text{gml}^{-1}$ de la vinclozoline n'a pas réussi à éviter la production de ZEN.

3. Hypothèses et objectifs

Dans le contexte de ce projet, les hypothèses suivantes ont été énoncées:

1. Les concentrations en toxines, désoxynivalénol (DON), T2, zéaralénone (ZEN), et fumonisine (FUM), mesurées dans les grains de maïs varient selon les hybrides ensemencés et selon les zones climatiques de culture au Québec.
2. Il existe une relation entre la maturité des hybrides de maïs-grain et les concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN, FUM).
3. L'application du fongicide foliaire Headline (pyraclostrobine) sur le maïs-grain n'a pas d'effet sur la concentration en mycotoxines (DON, T2, ZEN, FUM) des grains de maïs.

L'objectif général de ce projet est d'évaluer la concentration en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) de différents hybrides de maïs-grain cultivés sous différentes conditions climatiques du Québec. Plus précisément, les objectifs spécifiques pour ce projet sont:

1. Déterminer les concentrations en DON, T2, ZEN et FUM des grains de différents hybrides de maïs-grain ensemencés dans les trois zones d'unités thermiques maïs (UTM) du Québec afin de vérifier les effets de l'hybride et de la zone climatique.
2. Vérifier le lien entre la maturité physiologique des hybrides de maïs-grain et les concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM).
3. Évaluer l'effet du fongicide foliaire Headline (pyraclostrobine) sur le contenu en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) chez différents hybrides de maïs-grain.

4. Évaluation des concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) de différents hybrides de maïs-grain dans trois zones climatiques du Québec

4.1 Introduction

À l'est du Canada, les espèces de *Fusarium* sont dominantes chez les céréales et en particulier chez le maïs-grain (Campbell et coll., 2002). Les mycotoxines plus communes sont le désoxynivalénol (DON) et la zéaralénone (ZEN) qui sont produites principalement par *Fusarium graminearum* Schwabe [forme sexuée *Gibberella zae* (Schwein.) Petch] et la fumonisine qui est produite par *Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg. (Miller et coll., 1995; Reid et coll., 1999; Bailey et coll., 2004). De plus, une autre toxine mineure mais plus toxique est la T2, souvent produite par *F. sporotrichioides*. L'effet de chacune des quatre mycotoxines peut causer des maladies et même entraîner la mort chez les animaux et particulièrement chez le porc, un monogastrique (D'Mello et coll., 1997). Au Québec, puisque le maïs-grain est la composante principale de la ration porcine, il apparaît donc nécessaire d'évaluer son contenu en mycotoxines. Parmi les quatre mycotoxines mentionnées, le désoxynivalénol (DON) est la plus répandue dans l'est du Canada, alors que la présence des autres toxines (T2, ZEN, FUM) dans les grains est généralement faible (Campbell et coll., 2002).

Selon plusieurs études, la production de *Fusarium spp.* et l'accumulation des mycotoxines sont influencées par les conditions environnementales et les hybrides (Sutton et coll., 1980; Vigier et coll., 1997; Reid et coll., 1999; de la Campa et coll., 2005; Hooker et Schaafsma, 2005). L'infection par le *Fusarium graminearum* et la production de DON sont favorisées par des températures modérées à chaudes (optimum 25–28°C) associées à des conditions humides et des précipitations fortes au cours de la période critique de l'apparition des soies et de la maturation, soit en juillet et août dans l'est du Canada (Sutton et coll., 1980; Sutton, 1982; Miller et coll. 1995). La toxine ZEN est souvent produite dans des conditions de basses températures (optimum 17–28°C) avec une forte humidité (90 %) (Doohan et coll., 2003; Munkvold, 2003b). Par contre, le *Fusarium verticillioides* et la toxine fumonisine (FUM) sont souvent produits sous des conditions environnementales chaudes et sèches entre l'apparition des soies et le remplissage des grains (Miller et coll., 1995; Vigier et coll.,

1997; de la Campa et coll., 2005). Enfin, l'accumulation de toxine T2 est également favorisée par des températures modérément chaudes (optimum 20–25°C) et des conditions humides (Doohan et coll., 2003).

Puisque les conditions environnementales ne peuvent être contrôlées par les producteurs, différentes pratiques culturales peuvent être utilisées afin de minimiser l'impact négatif du climat. Selon Hooker et Schaafsma (2005), parmi toutes les variables agronomiques, l'hybride a un impact majeur sur le contenu en mycotoxines (DON et FUM). Le choix d'hybrides plus tolérants ou résistants à la fusariose pourrait permettre de minimiser les contenus en mycotoxines chez le maïs-grain (Mesterházy et coll., 2012). Dans l'est du Canada, des études sur la qualité et la résistance des hybrides ont été généralement réalisées en Ontario, mais aucune étude sur la résistance des hybrides ensemencés au Québec et leur contenu en mycotoxines n'est disponible. Donc, une étude approfondie sur le sujet au Québec serait appréciée.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Mise en place des essais et prise de données

Les essais utilisés dans ce mémoire font partie des essais des Réseaux grandes cultures du Québec (RGCQ). Ces essais ont été conduits en 2009, 2010 et 2011, dans les trois zones d'unités thermiques maïs du réseau maïs du RGCQ. Chacune des zones d'UTM comprend habituellement trois sites (tableau 2).

Tableau 2. Zones et sites d'essais des Réseaux grandes cultures du Québec (RGCQ)

Zone	UTM ^a	Nombre de sites	Sites	Coordonnées
1	2700 - 2900	3	Saint-Mathieu-de-Beloeil	Lat. 45°34' N, Long 73°12' O
			Saint-Hyacinthe	Lat. 45°34' N, Long 72°55' O
			Sainte-Martine	Lat. 45°13' N, Long 73°51' O
2	2500 - 2699	2	Saint-Alexis-de-Montcalm	Lat. 45°56' N, Long 73°36' O
			Saint-Edmond-de-Grantham Princeville	Lat. 45°52' N, Long 72°40' O Lat. 46°10' N, Long 71°52' O
3	2499 et moins	3	Saint-Augustin-de-Desmaures Saint-Albert	Lat. 46°44' N, Long 71°31' O Lat. 46°0' N, Long 72°51' O

^aUTM = Nombre d'unités thermiques maïs

Les données météorologiques correspondantes sont présentées à l'annexe A. Ces données proviennent des stations d'Environnement Canada situées le plus près de chacun des sites

expérimentaux (normales et moyennes climatiques canadiennes - Environnement Canada. 2013), sauf celles de Saint-Mathieu-de-Beloeil qui proviennent de la station météo du Centre de recherche sur les grains (CÉROM). Le type de sol, le pH et le précédent cultural de chaque site sont présentés aux tableaux 3, 4 et 5 pour les trois ans. Chaque site d'essai d'hybrides de maïs grain comprenait deux sous-essais séparant les hybrides hâtifs des hybrides tardifs, identifiés comme tels selon leurs besoins en UTM. Chaque essai était établi selon un dispositif en blocs complets avec quatre répétitions. Chaque hybride était implanté en parcelle constituée de deux rangs de 6 m de long, espacés de 76 cm et sur lesquels l'espacement moyen entre les plants était de 17 cm, soit un total de 36 plants pour 6 m. La population à l'hectare finale était donc de 74 360 plants/ha.

Tableau 3. Caractéristiques des sites expérimentaux en 2009

Site ^a	Type de sol ^b	Date de semis	Date de récolte	Moy. maturité physiol.	Culture précéd.	Travail du sol ^d		pH	Engrais appliqués (kg/ha)			Herbicides utilisés		
						Aut	Prin		N	P	K	Nom	Taux	Méthode
BEL	LA	H: 5 mai T: 5 oct.	H: 26 oct. T: 26 oct.	H: 10 oct. T: 14 oct.	Seigle d'automne	V	P	7,0	170	35	0	Dual II Magnum+ Marksman	1,75 L/ha +4,5L/ha	prélevée
PRI	LS	H: 5 mai T: 5 nov.	H: 2 nov. T: 4 oct.	H: 13 oct. T: 14 oct.	Orge	R	HR	7,3	168	70	119	Primextra II Magnum+ Callisto	4,0 L/ha +0,30L/ha	prélevée

^aBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; PRI = Princeville.

^bLA = loam argileux; LS = loam sableux.

^cH = hâtif; T = tardif.

^dV = vibro; HR = herse rotative; P = peigne; R = rotobêche.

Source: adapté de résultats 2009 et recommandation 2010, RGCQ.

Tableau 4. Caractéristiques des sites expérimentaux en 2010

Site ^a	Type de sol ^b	Date de semis	Date de récolte	Culture précéd. ^c	Travail du sol ^e		pH	Engrais appliqués (kg/ha)			Herbicides utilisés		
					Aut	Prin		N	P	K	Nom	Taux	Méthode
HYA	L	7 mai	28 oct.	S	L	V	6,7	170	95	75	Primextra II Magnum	4,0 l/ha	présemis
BEL	LA	5 mai	19 oct.	S	V	P	7,0	170	70	0	Dual II Magnum +Marksman	1,75 l/ha +4,5 l/ha	prélevée
EDM	LS	19 mai	2 nov.	S	R	R	6,7	170	40	75	Primextra II Magnum	4,0 l/ha	présemis
ALE	A	13 mai	23 oct.	P	L	V	6,4	170	45	15	Accent+Callisto+Aatrex	0,33g/h+0,21l/ha+0,58l/ha	postlevée
ALB	L	14 mai	18 oct.	M	C	HR	7,6	160	55	118	Primextra II Magnum+Callisto	4,0 L/ha +0,30 L/ha	prélevée
AUG	LS	18 mai	22 oct.	S	L	V	6,6	170	52	33	Primextra II Magnum+Callisto	3 l/ha +0,3l/ha	prélevée
PRI	LS	13 mai	25 oct.	B	L	HR	7,2	168	49	98	Primextra II Magnum+Callisto + Dual II Magnum	4,0 L/ha +0,30L/ha+1,75l/ha	prélevée

^aHYA = Saint-Hyacinthe; BEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures; PRI = Princeville.

^bL = loam; A = argile; LA = loam argileux; LS = loam sableux.

^cS = Soya; B = blé; P = prairie; M = maïs; O = orge.

^dL = labour; C = chisel; V = vibro; HR = herse rotative; P = peigne; R = rotobêche.

Source: adapté de résultats 2010 et recommandation 2011, RGCQ.

Tableau 5. Caractéristiques des sites expérimentaux en 2011

Site ^a	Type de sol ^b	Date de semis	Date de récolte	Culture précéd. ^c	Travail du sol ^d		pH	Engrais appliqués (kg/ha)			Herbicides utilisés		
					Aut.	Prin.		N	P	K	Nom	Taux	Méthode
HYA	L	12 mai	24 oct.	S	L	V	6,9	170	60	60	Accent+Callisto+A atrex	33 g/ha+ 0,21 l/ha+ 0,58 l/ha	postlevée
MAR	A	12 mai	27 oct.	B	C	V, 2 p	6,0	170	40	60	Dual II Magnum+ Converge480	1,75 l/ha +2,84 l/ha	prélevée
BEL	LA	12mai	-	S	V	P	7,6	170	60	0	Dual II Magnum+Marksman	1,75 l/ha +4,5 l/ha	prélevée
EDM	LS	1 juin	27 oct.	S	A	R	7,0	170	20	60	Primextra II	4 l/ha	postlevée
ALE	A	30 mai	27 oct.	P	L	V	7,0	170	20	20	Magnum+Oracle	+1 l/ha	postlevée
ALB	L	22 mai	18 oct.	M	C	HR	7,5	160	77	60	Primextra II	4 l/ha	postlevée
AUG	LS	11 mai	24 oct.	O	L	V, 2p	6,8	170	27	41	Magnum+Callisto	+1 l/ha	postlevée
PRI	LS	21 mai	24 oct.	B	L	HR	7,4	160	77	60	Primextra II	4,0 L/ha+ 0,30 L/ha	prélevée
											Magnum+Callisto	3 l/ha+ 0,31/ha	prélevée

^aHYA = Saint-Hyacinthe; MAR = Sainte-Martine; BEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALE = Saint-Alexis-de Montcalm; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin de-Desmaures; PRI = Princeville.

^bL = loam; A = argile; LA = loam argileux; LS = loam sableux.

^cS = Soya; B = blé; P = prairie; M = maïs; O = orge.

^dL = labour; C = chisel; V = vibro; 2p = 2passages; A = aucun; HR = herse rotative; P = peigne; R = rotobêche.

Source: adapté de résultats 2011 et recommandation 2012, RGCQ

Dans le cadre de ce mémoire, certains essais ont été utilisés en 2009 et d'autres en 2010 et 2011. En 2009, on a utilisé les grains provenant d'un site de Saint-Mathieu-de-Beloeil (zone 1) et d'un site de Princeville (zone 3) où on avait pour chaque essai des hybrides hâtifs et tardifs (figure 2). On a considéré deux des quatre répétitions de chacun des essais.

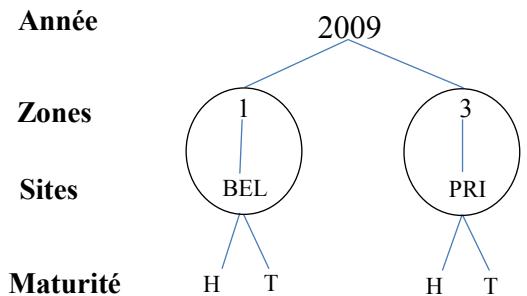
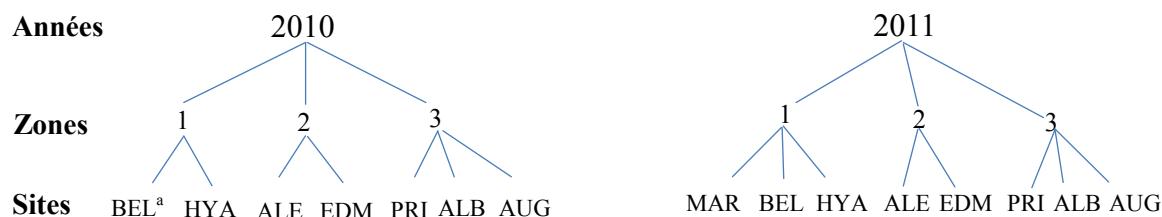


Figure 2. Schéma descriptif des zones et des sites d'essais en 2009

En 2010 et 2011, on a utilisé les grains provenant de deux ou trois sites de la zone 1, deux sites de la zone 2 et trois sites de la zone 3 (figure 3). Nous avons utilisé les grains provenant des essais tardifs seulement, en considérant deux répétitions pour chaque essai.



^aMAR = Sainte-Martine; BEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; HYA = Saint-Hyacinthe; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; PRI = Princeville; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures.

Figure 3. Schéma descriptif des zones et des sites d'essais en 2010 et 2011

Les hybrides de maïs-grain des essais RGCQ sont souvent différents d'une année à l'autre et généralement différents d'une zone à l'autre. Par contre, il y a un certain nombre d'hybrides qui se répètent entre les années. Les nombres d'hybrides ensemencés et les nombres d'échantillons analysés en 2009, 2010 et 2011 sont présentés aux tableaux 6 et 7.

Tableau 6. Nombre d'hybrides de maïs-grain à l'essai pour chaque site expérimental en 2009

Site	Essai	Nombre d'hybrides	Nombre d'échantillons
Saint-Mathieu-de-Beloeil	Hâtif	54	108
	Tardif	65	130
Princeville	Hâtif	48	96
	Tardif	41	82

En 2010, 64 hybrides commerciaux ont été ensemencés sur deux sites différents de la zone 1, 45 hybrides sur deux sites de la zone 2 et 41 hybrides sur trois sites de la zone 3. En 2011, l'expérimentation a été répétée avec d'autres hybrides, soit 62 hybrides sur trois sites de la zone 1, 45 hybrides sur trois sites de la zone 2 et 40 hybrides sur deux sites de la zone 3 (tableau 7). Certains hybrides étaient communs aux deux années (2010 et 2011), soit 19 hybrides communs en zone 1, 13 hybrides en zone 2 et 22 hybrides en zone 3.

Tableau 7. Nombre d'hybrides de maïs-grain à l'essai pour chaque site expérimental pendant les années 2010 et 2011

Année	Zone	Site	Nombre d'hybrides	Nombre d'échantillons
2010	1	Saint-Mathieu-de-Beloeil	64	128
		Saint-Hyacinthe	64	128
	2	Saint-Alexis	45	90
		Saint-Edmond	45	90
	3	Saint-Albert	41	82
		Princeville	41	82
		Saint-Augustin-de-Desmaures	41	82
2011	1	Sainte-Martine	62	124
		Saint-Mathieu-de-Beloeil	62	124
		Saint-Hyacinthe	62	124
	2	Saint-Alexis	45	90
		Saint-Edmond	45	90
	3	Saint-Albert	40	80
		Princeville	40	80
		Saint-Augustin-de-Desmaures	40	80

Les dates de semis et de récolte, le précédent cultural, le travail du sol, la fertilisation et les herbicides appliqués par site sont présentés aux tableaux 3, 4, 5 pour les années 2009, 2010

et 2011, respectivement. Le maïs-grain a été récolté lorsque la majorité des hybrides étaient parvenus à maturité ou suite au premier gel meurtrier (-2°C). Les épis de tous les plants de maïs (droits ou versés) ont été recueillis puis égrenés. Lors de la récolte de maïs-grain, un échantillon d'environ 500 g par parcelle a été prélevé et séché jusqu'à dessiccation complète en étuve à 60°C pendant une période minimale de 72 h (Ma et Dwyer, 2001). On a utilisé les mêmes blocs échantillonnés pour estimer la maturité physiologique des grains. Les échantillons qui ont été séchés à l'étuve, ont été broyés et conservés dans des sacs en plastique jusqu'à ce que les mycotoxines soient analysées. Nous avons recueilli un total de 1890 échantillons, soit 416 échantillons en 2009, 682 échantillons en 2010 et 792 échantillons en 2011.

Dans le cadre des essais RGCQ réalisés au cours des années 2009, 2010 et 2011 pour chacune des trois zones de production, plusieurs variables ont été évaluées : la maturité physiologique du grain, la présence visuelle de champignons, le rendement (kg/ha), la teneur en eau (%) et le poids spécifique (kg/hL) des grains.

La présence ou l'absence visuelle de champignons a été observée sur 4 épis recueillis de façon aléatoire dans chaque parcelle. La notation a été faite selon une échelle de 0 à 4 où 0 indiquait qu'il n'y avait aucun symptôme de champignons et 4 indiquait que les 4 épis avaient des symptômes. Aucune évaluation sur l'intensité ou la surface atteinte de l'épi n'a été faite.

La maturité physiologique des différents hybrides de maïs-grain a été mesurée en se basant sur l'évolution de la teneur en eau des grains de la fin août à la fin septembre afin de pallier au fait que l'utilisation de critères visuels uniquement n'est pas précise pour déterminer si le maïs-grain est parvenu ou non à la maturité physiologique. De plus, cette méthode est plus efficace pour une grande variété de lignées ou d'hybrides que la méthode de développement du point noir (Tremblay et coll., 2008). Pour l'échantillonnage, deux épis ont été récoltés dans chaque parcelle dans deux blocs pour deux sites de chaque zone. La récolte a été faite une première fois au début de septembre et une seconde fois à la fin de septembre. Les deux épis récoltés par parcelle ont été épluchés et mis dans un sac de plastique fermé de façon hermétique puis transportés au laboratoire pour l'évaluation de la maturité physiologique. Les grains ont été séchés à l'étuve à 60°C pendant une période minimale de 72 h (Ma et

Dwyer 2001). La teneur en eau des grains de chacun des échantillons a été calculée à partir des poids humide et sec de l'échantillon. Puisque la teneur en eau des grains varie de façon linéaire au cours de cette période, il est possible d'estimer le moment précis où cette teneur en eau des grains atteint 35 % qui correspond à l'atteinte de la maturité physiologique (Tremblay et coll., 2008).

4.2.2 Analyses de mycotoxines

Dans ce projet, on a utilisé le test ELISA pour mesurer les concentrations des quatre mycotoxines: désoxynivalénol (DON), T2, zéaralénone (ZEN) et fumonisine (FUM) avec des trousse de tests quantitatifs Veratox (corporation NEOGEN). Les tests ont été réalisés en suivant la procédure détaillée fournie dans chaque trousse pour chacune des toxines. Les résultats valables devaient être inférieurs à 5,0 ppm pour le DON, à 0,25 ppm pour le T2, à 0,5 ppm pour la zéaralénone et à 6,0 ppm pour la fumonisine. Si des échantillons avaient des valeurs supérieures à ces limites, ils devaient être repris avec des dilutions. De même, lorsque la valeur du DON était inférieure à 0,025 ppm, l'échantillon était repris avec une trousse plus précise DON HS qui mesure une quantité de DON située entre 0,025 et 0,25 ppm.

Les hybrides de maïs-grain correspondaient aux traitements et les concentrations des quatre mycotoxines (DON, T2, ZEN, FUM) constituaient nos variables. Dans cette étude, 7576 analyses des quatre mycotoxines ont été effectuées lorsqu'on totalise tous les échantillons des trois années (2009, 2010 et 2011). L'analyse de laboratoire des toxines est expliquée en annexe B.

4.2.3 Analyses statistiques

Pour chacune des quatre mycotoxines, des analyses de la variance des moyennes ont été faites avec la procédure MIXED de SAS (SAS Institute, 2003). La normalité des données a été vérifiée avec la procédure UNIVARIATE tandis que l'homogénéité de la variance a été vérifiée visuellement avec le graphique des résidus. Les données ont été transformées au besoin (transformation logarithmique) pour faire les analyses statistiques toutefois en tout temps les LSMEANS des données non transformées ont été présentées. Les effets des

traitements ont été considérés significatifs à $P < 0,05$. Les différences entre les moyennes 2 à 2 ont été évaluées en utilisant l'instruction LSMEANS/DIFF.

Pour l'analyse de variance sur les hybrides communs aux deux années 2010 et 2011 à l'intérieur d'une même zone, les facteurs sites, années et hybrides étaient considérés fixes et les répétitions aléatoires. Pour l'analyse de variance sur une variable commune aux hybrides de tous les sites et des deux années 2010 et 2011, les facteurs sites et années étaient considérés fixes et les répétitions aléatoires. Le facteur zone a été testé par contrastes à priori en comparant des sites entre eux. Pour l'analyse de variance sur une variable commune à tous les hybrides des essais d'hybrides hâtifs et tardifs pour l'année 2009, les facteurs sites et maturités ont été considérés fixes et les répétitions aléatoires.

Pour chacune des zones et chaque année (2009, 2010 et 2011), puis en combinant les années, des régressions linéaires ont également été effectuées en utilisant la procédure PROC REG du logiciel statistique SAS (SAS Institute, 2003).

4.3 Résultats et discussion

4.3.1 Contenus en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) des différents hybrides de maïs-grain selon les zones et les années

4.3.1.1 Contenus en désoxynivalénol (DON)

Les concentrations en DON de chaque hybride évalué dans chacune des zones et chaque année sont présentées aux figures 4, 5 et 6. On y voit les hybrides classés selon une concentration croissante en DON. Ainsi les hybrides les plus résistants à la fusariose sont illustrés dans la partie gauche des figures et se distinguent des moins résistants, illustrés dans la partie droite des figures. Il y avait des différences significatives entre les hybrides à tous les sites et pour toutes les années sauf dans la zone 1 en 2009 où la fusariose était presque inexistante (tableau 8).

Au cours des trois années, sur 403 hybrides de maïs évalués dans les trois zones, 88 % de ces hybrides avaient des concentrations en DON égales ou supérieures à 0,01 ppm, qui représentait notre seuil de détection (figures 4, 5 et 6). Dans la zone 1 (2700 à 2900 UTM), 14 % des 65 hybrides évalués en 2009 avaient des concentrations égales ou supérieures à

0,01 ppm tandis que cette proportion était de 100 % en 2010 (64 hybrides) et en 2011 (62 hybrides). Dans la zone 2 (2500 à 2700 UTM), 100 % des 45 hybrides évalués en 2010 et en 2011 avaient des concentrations en DON de plus de 0,01 ppm. Enfin, dans la zone 3 (2300 à 2500 UTM), 95 % des 41 hybrides évalués en 2009 avaient des concentrations en DON de plus de 0,01 ppm tandis que cette proportion était de 100 % en 2010 (41 hybrides) et en 2011 (40 hybrides).

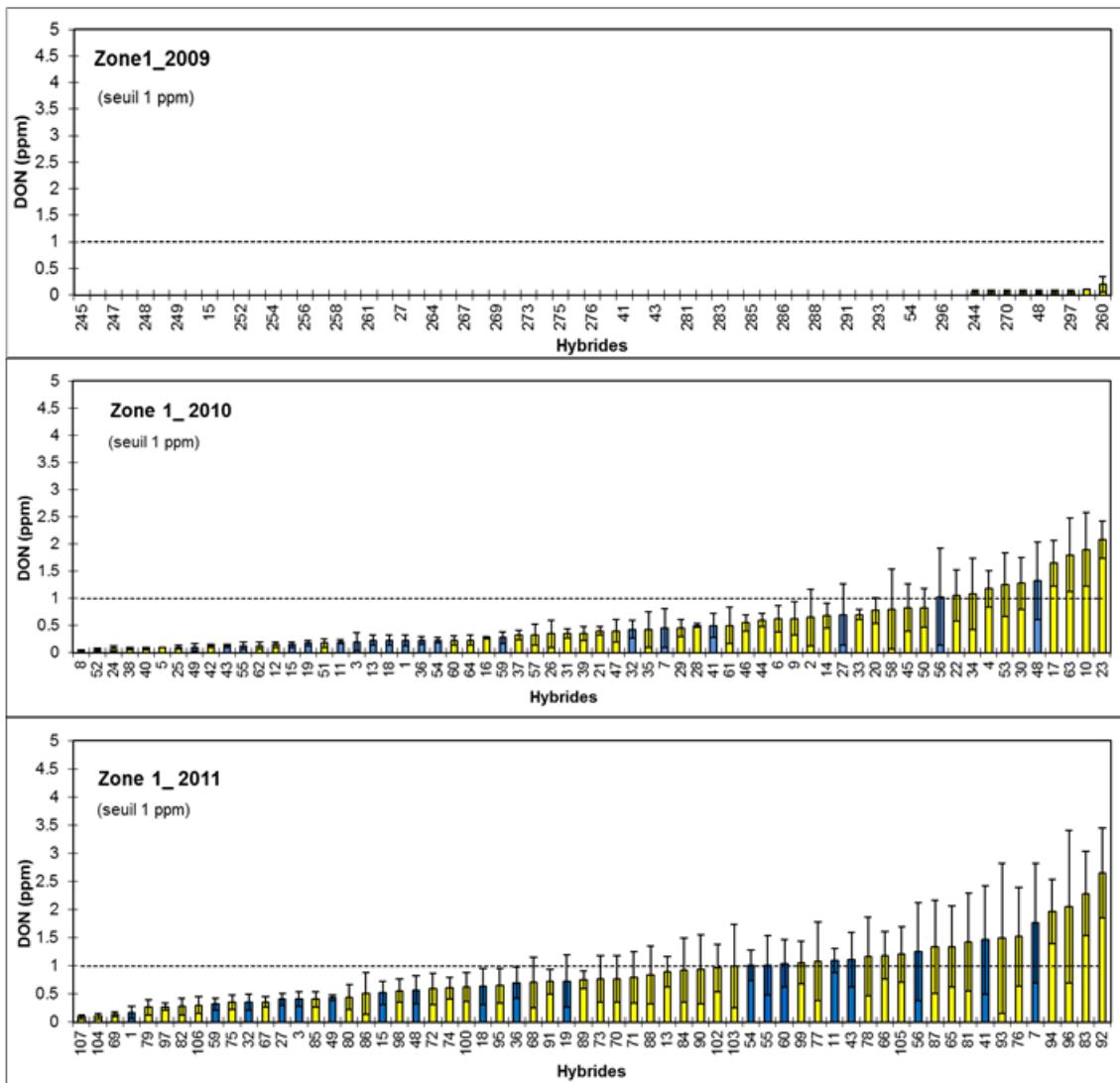


Figure 4. Concentration en DON des hybrides tardifs de maïs-grain du RGCQ pour la zone 1 en 2009, 2010 et 2011. Les bâtons en bleu (gris foncé) montrent les hybrides communs aux trois années dans une même zone

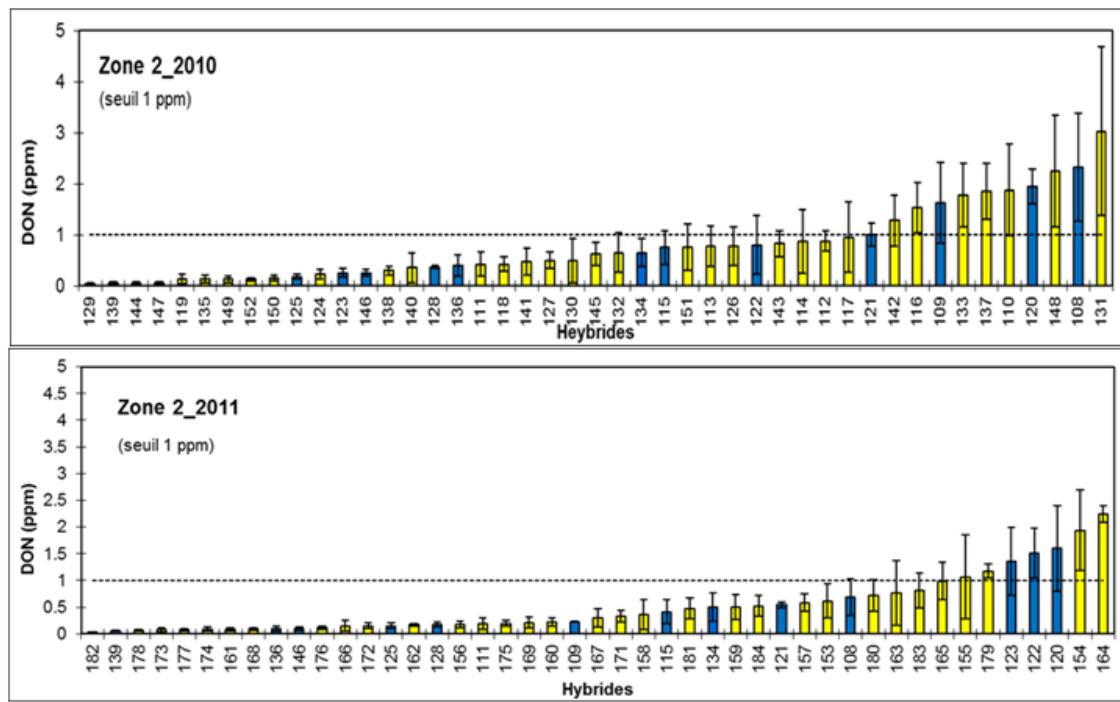


Figure 5. Concentration en DON des hybrides tardifs de maïs-grain du RGCQ pour la zone 2 en 2010 et 2011. Les bâtons en bleu (gris foncé) montrent les hybrides communs aux trois années dans une même zone.

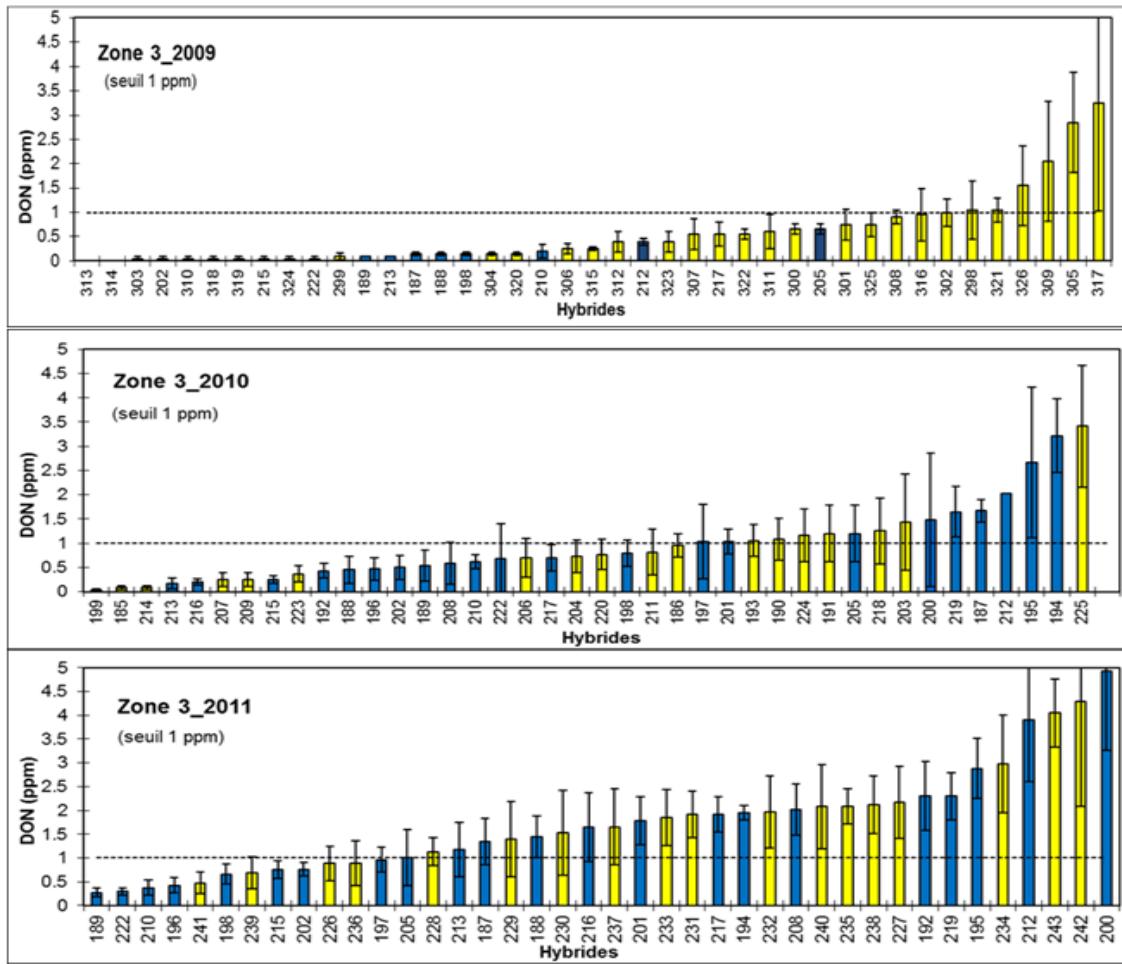


Figure 6. Concentration en DON des hybrides tardifs de maïs-grain du RGCQ pour la zone 3 en 2009, 2010 et 2011. Les bâtons en bleu (gris foncé) montrent les hybrides communs aux trois années dans une même zone.

Le tableau 8 présente les répartitions (%) des hybrides tardifs répartis en quatre classes selon leur concentration en DON, dans les trois zones pour les années 2009, 2010 et 2011. Puisqu'il est convenu par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) que la concentration en DON ne devrait pas dépasser le seuil de 1 ppm dans la ration alimentaire pour les porcs, les deux classes des concentrations les plus basses en DON ont été regroupées pour donner un portrait plus global des hybrides en fonction de ce seuil. Ainsi, dans la zone 1, 100 % des 65 hybrides évalués en 2009 avaient des concentrations en DON de moins de 1 ppm tandis que cette proportion était de 83 % en 2010 et de 73 % en 2011. Dans la zone 2, 78 % des 45 hybrides évalués en 2010 avaient des concentrations en DON de moins de 1 ppm tandis que cette proportion était de 86 % en 2011. Enfin, dans la zone 3, 85 % des 41 hybrides évalués en 2009 avaient des concentrations en DON de moins de 1 ppm tandis que cette proportion n'était que de 67 % en 2010 et de 30 % en 2011. On observe que les pourcentages d'hybrides avec une concentration en DON en dessous de 1 ppm étaient relativement similaires entre les années 2010 et 2011 pour les zones 1 et 2 (moyenne de 80 %). Par contre, dans la zone 3, il n'y avait que 49 % des hybrides qui possédaient des concentrations en DON inférieures à 1 ppm en 2010 et 2011. Les concentrations en DON en zone 3 semblent donc supérieures aux concentrations des deux autres zones en 2010 et 2011. Les conditions climatiques semblent avoir été plus favorables au développement des toxines dans la zone 3 avec des températures modérées et des précipitations plus abondantes (annexe A). Ces conditions ont pu favoriser le développement du *F. graminearum* et fait possiblement augmenter les contenus en DON.

La moyenne générale de DON pour toutes les zones évaluées de 2009 à 2011 a été de 0,74 ppm. La concentration moyenne en DON a varié au cours de chacune des années et a généralement été inférieure à 1 ppm sauf dans la zone 3 en 2011, où la plus haute concentration en DON a été observée (tableau 8). Les concentrations moyennes ont varié de 0 à 4,93 ppm en DON au cours des trois années pour les trois zones. Des études menées en Ontario ont indiqué des concentrations moyennes de 0,61 ppm (Scott, 1997) et de 1,3 ppm en DON (Hooker et Schaafsma, 2005) chez le maïs-grain. L'étude réalisée par Scott (1997) a aussi révélé que 86 % des échantillons analysés sur une période de 15 ans avaient des concentrations égales ou supérieures à 0,1 ppm alors que l'enquête effectuée par Hooker et Schaafsma (2005) démontrait que 73 % des échantillons analysés sur 8 ans avaient des

concentrations en DON égales ou supérieures à 0,2 ppm. De plus, dans une étude réalisée de 1991 à 1998, Campbell et coll. (2002) ont retrouvé une moyenne générale de 0,53 ppm en DON pour des échantillons de maïs-grain provenant du Québec et 88 % des échantillons étaient contaminés. Il semble donc que nos résultats soient similaires aux résultats de quelques études réalisées précédemment.

Tableau 8. Répartition (%) des hybrides de maïs-grain selon quatre classes de concentration en désoxynivalénol (DON), ainsi que les valeurs minimum, maximum et moyenne de la concentration en DON des hybrides tardifs du RGCQ pour les trois zones climatiques au cours des années 2009, 2010 et 2011

	Zone1			Zone2		Zone3		
	2009	2010	2011	2010	2011	2009	2010	2011
Classes (%)								
0-0,5	100	64,1	27,4	48,9	62,2	58,5	32,5	12,5
0,5-1	0	18,8	45,2	28,9	24,4	26,8	35,0	17,5
	100^a	82,9	72,6	77,8	86,6	85,4	67,5	30,0
1-2	0	15,6	22,6	15,6	11,1	7,3	25,0	37,5
>2	0	1,6	4,8	6,7	2,2	7,3	7,5	32,5
Concentration en DON								
Minimum (ppm)	0,00	0,03	0,09	0,04	0,03	0,00	0,03	0,27
Maximum (ppm)	0,20	2,08	2,65	3,03	2,25	3,25	3,42	4,93
Moyenne (ppm)	0,01	0,53	0,86	0,78	0,51	0,56	0,95	1,73
Valeur de P								
Effet hybrides	ns ^b	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,008	<0,001	<0,001

^aLa valeur encadrée correspond au pourcentage total d'hybrides en-dessous du seuil de 1 ppm.

^bns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

4.3.1.2 Contenus en T2, en zéarylénone (ZEN) et en fumonisine (FUM)

Le tableau 9 présente les répartitions (%) des hybrides tardifs répartis en deux classes de concentration en T2, dans les trois zones et pour les années 2009, 2010 et 2011. On y observe qu'aucun hybride n'a dépassé le seuil limite de 1000 ppb de concentration en T2 tel qu'exigé pour l'alimentation des porcs par l'ACIA et qu'il n'y avait pas toujours de différences significatives entre les hybrides, tel qu'observé en 2009 dans la zone 1, et en 2010 et 2011 dans la zone 3. La moyenne globale de toutes les zones et des trois années est de 34,70 ppb en T2. Les concentrations moyennes dans la zone 2 étaient presque similaires pour les années 2010 et 2011, tandis que dans les zones 1 et 3, les concentrations ont varié (tableau 9). Compte tenu des faibles concentrations observées, ces résultats démontrent que la toxine T2 ne semble pas une toxine problématique.

Selon Campbell et coll. (2002), la contamination du maïs-grain avec cette toxine est rare dans l'est du Canada. Dans le cadre de leur étude, ils ont constaté que seulement 1,8 % des échantillons de maïs-grain provenant de l'est du Canada et en particulier 1,2 % des échantillons du Québec avaient une teneur en T2 au-dessus de 200 ppb entre 1991 et 1998. Si on utilise le seuil de cette étude (200 ppb) pour évaluer nos données, on voit que pour toutes les zones et les trois années (2009, 2010, 2011), il n'y avait que 3,2 % des hybrides qui avaient une concentration en T2 supérieure à 200 ppb. Ce résultat est en accord avec les conclusions de Campbell et coll. (2002), bien que le niveau de 3,2 % soit légèrement supérieur à celui observé dans leur étude (1,2 %).

Tableau 9. Répartition (%) des hybrides de maïs-grain répartis en deux classes de concentration en T2, ainsi que les valeurs minimum, maximum et moyenne de la concentration en T2 des hybrides tardifs du RGCQ pour les trois zones climatiques au cours des années 2009, 2010 et 2011

Classes (%)	Zone1			Zone2		Zone3		
	2009	2010	2011	2010	2011	2009	2010	2011
0-1000	100 ^a	100	100	100	100	100	100	100
>1000	0	0	0	0	0	0	0	0
Concentration en T2								
Minimum (ppb)	0,00	0,00	5,00	0,00	6,00	0,00	0,00	4,00
Maximum (ppb)	12,00	78,40	406,00	153,35	125,00	248,70	63,70	151,00
Moyenne (ppb)	2,92	15,96	101,65	38,45	30,53	35,84	15,18	37,13
Valeur de P								
Effet hybrides	ns ^b	0,018	0,012	0,013	0,029	0,037	ns	ns

^aLa valeur encadrée correspond au pourcentage total d'hybrides en-dessous du seuil de 250 ppb.

^bns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

Le tableau 10 présente les répartitions des hybrides répartis en deux classes de concentration en ZEN, dans les trois zones et pour les années 2009, 2010 et 2011. Les classes ont été basées sur le fait que, selon l'ACIA, la concentration en ZEN ne devrait pas dépasser le seuil de 250 ppb dans la ration porcine. L'effet des hybrides n'était pas significatif pour toutes les zones et les années. On remarque que dans la zone 1, 100 % des hybrides évalués en 2009 et en 2011 avaient des concentrations en ZEN de moins de 250 ppb tandis que cette proportion était de 98 % en 2010. Dans la zone 2, 98 % des hybrides évalués en 2010 avaient des concentrations en ZEN de moins de 250 ppb tandis que cette proportion était de 100 % en 2011. Enfin, dans la zone 3, 100 % des hybrides évalués en 2009 avaient des concentrations en ZEN de moins de 250 ppb tandis que cette proportion

était de 95 % en 2010 et de 98 % en 2011. Par conséquent, on donc peut conclure qu'une grande majorité des hybrides n'a pas dépassé le seuil de 250 ppb.

Les concentrations moyennes de ZEN dans la zone 3 étaient numériquement supérieures aux concentrations des deux autres zones en comparant les données des mêmes années. De plus, on constate que la moyenne totale de ZEN pour toutes les zones évaluées et pour les années 2009 à 2011 était de 34,5 ppb, alors que l'étude de Campbell et coll. (2002) avance une valeur moyenne de 80 ppb de ZEN pour l'est du Canada entre 1991 et 1998. La concentration de cette toxine a donc toujours été inférieure au seuil critique de 250 ppb.

Selon Campbell et coll. (2002), l'accumulation en ZEN est généralement faible dans l'est du Canada. Dans le cadre de leur étude, ils ont constaté que seulement 20,1 % des échantillons provenant de la province de Québec avaient une teneur en ZEN au-dessus de 30 ppb entre 1991 et 1998. Si on utilise le seuil de l'étude précédente (30 ppb) pour évaluer nos données, on voit que pour toutes les zones et les trois années (2009, 2010, 2011), il n'y avait que 34,7 % des hybrides ayant une concentration en ZEN au-dessus de 30 ppb. Donc, ce résultat est en accord avec les conclusions de Campbell et coll. (2002), bien que l'on constate une légère augmentation en ZEN dans notre étude.

Tableau 10. Répartition (%) des hybrides de maïs-grain répartis en deux classes de concentration en zéaralénone (ZEN), ainsi que les valeurs minimum, maximum et moyenne de la concentration en ZEN des hybrides tardifs du RGCQ pour les trois zones climatiques au cours des années 2009, 2010 et 2011

Classes (%)	Zone1			Zone2		Zone3		
	2009	2010	2011	2010	2011	2009	2010	2011
0-250	100^a	98	100	98	100	100	95	98
>250	0	1,6	0	2	0	0	5	2
Concentration en ZEN								
Minimum (ppb)	0,00	0,00	4,00	0,30	3,00	0,00	0,00	5,00
Maximum (ppb)	7,95	276,00	174,00	274,25	136,00	93,20	260,08	413,00
Moyenne (ppb)	0,88	21,31	46,52	42,10	23,71	9,37	56,13	75,95
Valeur de P								
Effet hybrides	ns ^b	ns	0,018	0,001	0,002	ns	<0,001	<0,001

^aLa valeur encadrée correspond au pourcentage total d'hybrides en-dessous du seuil de 250 ppb.

^bns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

Le tableau 11 représente la répartition (%) des hybrides selon deux classes de concentration en FUM dans les trois zones et pour les années 2009, 2010 et 2011. Selon l'ACIA, la concentration en FUM ne devrait pas dépasser le seuil de 10 ppm dans la ration porcine. Cette norme est recommandée aux États-Unis pour la FUM mais aucune norme n'est encore recommandée pour la FUM au Canada. Dans la présente étude, aucun hybride n'a dépassé le seuil de 5 ppm et indique bien que les concentrations en FUM représentaient peu de risques pour l'industrie porcine. L'effet hybride a été significatif uniquement dans la zone 2 en 2011 et dans la zone 3 en 2010.

Quel que soit la zone et l'année, les concentrations moyennes étaient toutes très basses, soient en-dessous de 1 ppm. On constate que les moyennes de FUM dans les zones 1 et 2 étaient supérieures à celles de la zone 3 au cours de chacune des années. La moyenne générale de FUM pour toutes les zones évaluées au cours des trois années a été de 0,22 ppm, ce qui démontre bien que la FUM ne semblait pas être une toxine problématique dans aucune des trois zones. Cette valeur est similaire à celle rapportée dans l'étude de Campbell et coll. (2002) dans l'est du Canada (0,31 ppm) mais plus faible que celle de l'étude de Hooker et Schaafsma (2005) en Ontario (1,3 ppm).

Dans l'étude réalisée de 1997 à 2000 en Ontario, Hooker et Schaafsma (2005) rapportaient que moins de 20 % des échantillons avaient une concentration égale ou supérieure à 2 ppm de FUM. Dans la présente étude, il n'y a que 2 % des hybrides évalués qui affichaient une concentration en FUM de plus de 2 ppm. On pourrait donc conclure que les concentrations de cette toxine semblent moins élevées dans la province de Québec qu'en Ontario.

Selon Campbell et coll. (2002), la présence de FUM chez le maïs était généralement faible dans l'est du Canada. Selon ces auteurs, 29,1 % des échantillons de maïs-grain de cette région et 33,7 % des échantillons provenant du Québec avaient des concentrations en FUM au-dessus de 0,1 ppm. Si on utilise le même seuil pour nos données, on constate que pour toutes les zones et les trois années (2009, 2010, 2011), 32,3 % des hybrides avaient une concentration en FUM au-dessus de 0,1 ppm. Donc, ce résultat est en accord avec les conclusions de Campbell et coll. (2002) et montre bien que cette toxine est mineure dans l'est du Canada et particulièrement dans la province du Québec.

Tableau 11. Répartition des hybrides de maïs-grain répartis en deux classes de concentration en fumonisine (FUM), ainsi que les valeurs minimum, maximum et moyenne de la concentration en FUM des hybrides tardifs du RGCQ pour les trois zones climatiques au cours des années 2009, 2010 et 2011

	Zone1			Zone2		Zone3		
	2009	2010	2011	2010	2011	2009	2010	2011
Classes (%)								
0-5	100^a	100						
>5	0	0	0	0	0	0	0	0
Concentration en FUM								
Minimum (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum (ppm)	0,40	2,23	2,93	2,07	1,30	0,20	1,25	0,72
Moyenne (ppm)	0,03	0,27	0,89	0,21	0,22	0,02	0,09	0,09
Valeur de P								
Effet hybrides	ns ^b	ns	ns	ns	0,004	ns	<0,001	ns

^aLa valeur encadrée correspond au pourcentage total d'hybrides en-dessous du seuil de 5 ppm.

^bns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

4.3.2 Évaluation des effets de l'année, du site et des hybrides de maïs-grain sur les contenus en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) sur des hybrides communs pour chaque zone

4.3.2.1 Contenus en DON

Dans chaque zone, certains hybrides étaient communs pour les deux années de l'étude (2010 et 2011). Le nombre d'hybrides communs ont été de 19, 13 et 22 respectivement pour les zones 1, 2 et 3. Le tableau 12 présente l'ANOVA effectuée sur les concentrations en DON des hybrides communs, afin de vérifier les effets de l'année, du site et des hybrides. On constate que, dans la zone 1, l'année a eu un effet majeur sur cette toxine ($F = 34,60$). En 2011, la moyenne du DON était significativement plus élevée que celle observée en 2010. Il est probable que ces différences aient été principalement causées par les conditions météorologiques (Miller et coll., 1995; Vigier et coll., 1997). En effet, la production de *F. graminearum* est favorisée par des températures modérées à chaudes et des conditions humides avec des précipitations fortes au cours de la période critique de l'apparition des soies et de la maturation des grains, soit en juillet et en août (Sutton et coll., 1980; Sutton, 1982; Miller et coll. 1995). Dans le cas de la zone 1, l'incidence plus élevée en DON observée 2011 pourrait s'expliquer par les précipitations nettement au-dessus de la normale) observées au mois d'août sur chacun des sites comparativement à la saison de 2010. En revanche, les températures étaient similaires pendant cette période pour les deux années (annexe A).

La seule interaction significative obtenue pour la zone 1 était celle observée entre les sites et les hybrides (tableau 12 et figure 7). On observe que certains hybrides avaient des concentrations en DON variables selon les sites, notamment les hybrides 7, 41, 48 et 56 étaient assez variable (figure 7). Les hybrides 7 et 56 avaient des concentrations en DON supérieures au site de Saint-Mathieu-de-Beloeil par rapport au site de Saint-Hyacinthe tandis que, pour les deux hybrides 41 et 48, c'était plutôt l'inverse. Par contre, les hybrides 15, 1, 3, 32, 49 et 59 avaient toujours une faible concentration en DON (moins de 0,5 ppm) peu importe le site. Cela permet de les identifier comme étant les hybrides les plus résistants de la zone 1 pour les deux années 2010 et 2011.

Tableau 12. Concentrations en DON des hybrides de maïs-grain communs dans les zones 1, 2 et 3 selon les années, les sites et les hybrides

Effets	Zone 1		Zone 2		Zone 3	
		DON (ppm)		DON (ppm)		DON (ppm)
Année	2010	0,39	2010	0,82	2010	1,02
	2011	0,96	2011	0,57	2011	1,60
Site	BEL ^a	0,63	ALE	0,40	ALB	1,66
	HYA	0,73	EDM	0,99	AUG	1,31
					PRI	0,95
Hybride	7 ^c	1,49	109	0,92	187	1,51
	11	0,78	115	0,58	188	0,95
	13	0,64	120	1,78	189	0,40
	15	0,36	121	0,77	192	1,37
	18	0,57	108	1,51	194	2,58
	19	0,51	122	1,16	195	2,78
	1	0,22	123	0,80	196	0,44
	3	0,25	125	0,16	197	1,00
	27	0,57	128	0,31	198	0,73
	32	0,42	134	0,57	200	3,21
	41	1,25	136	0,25	201	1,41
	43	0,62	139	0,05	202	0,63
	48	1,25	146	0,18	205	1,10
	49	0,30			208	1,30
	54	0,65			210	0,50
	55	0,75			212	2,97
	56	1,35			213	0,67
	59	0,35			215	0,50
	60	0,54			216	0,92
					217	1,31
					219	1,98
					222	0,49
Valeurs de <i>P</i>						
Année		0,004		0,043		<0,001
Site		ns ^d		0,002		0,004
Année*Site		ns		0,038		0,005
Hybride		ns		<0,001		<0,001
Année*Hybride		ns		<0,001		<0,001
Site*Hybride		0,014		0,002		0,005
Année*Site*Hybride		ns		0,003		0,027
Valeurs de <i>F</i>						
Année		34,60		8,59		61,92
Site		0,64		48,17		15,43
Année*Site		3,61		9,29		14,11
Hybride		1,51		13,28		10,96
Année*Hybride		1,49		4,05		4,71
Site*Hybride		2,12		3,15		1,84
Année*Site*Hybride		1,00		3,08		1,58

^aBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; HYA = Saint-Hyacinthe; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures; PRI = Princeville

^bLes moyennes suivies de deux lettres identiques ne sont pas significativement différentes au seuil de *P* <0,05.

^cChaque numéro correspond à un hybride différent.

^dns = non significatif au seuil de *P* > 0,05.

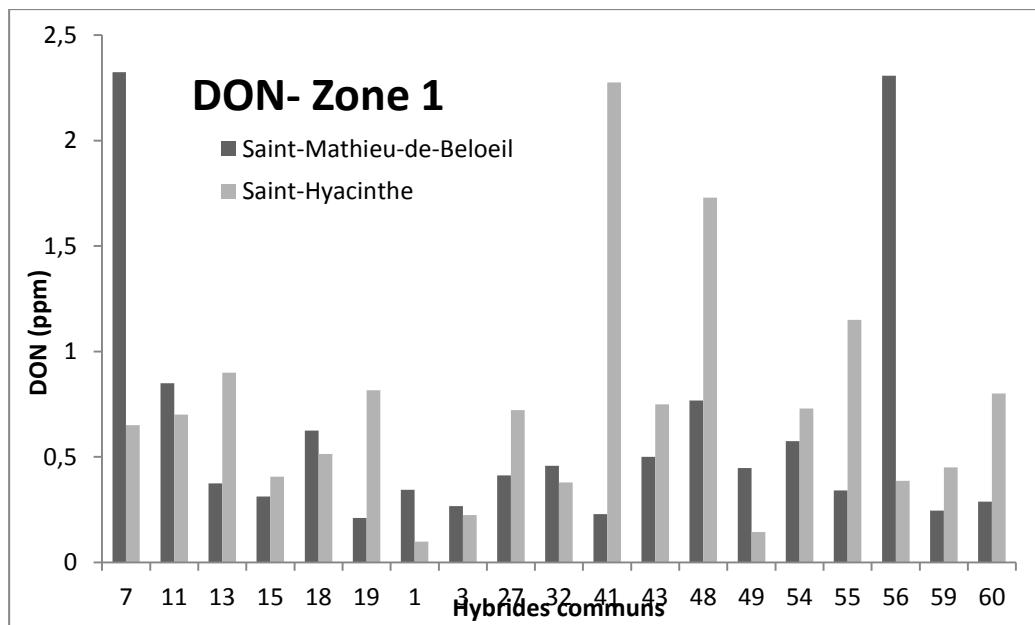


Figure 7. Concentration en DON des 19 hybrides de maïs-grain communs aux deux sites de Saint-Mathieu-de-Beloeil et de Saint-Hyacinthe (moyenne de 2010 et de 2011)

Pour la zone 2, on observe que le site a eu un impact majeur sur l'accumulation en DON ($F = 48,17$); l'incidence en DON était plus élevée à Saint-Edmond qu'à Saint-Alexis (tableau 12). Cela peut s'expliquer par les données des conditions météorologiques puisque celles-ci montrent que les températures et précipitations des mois de juillet et août étaient plus favorables à la fusariose à Saint-Edmond qu'à Saint-Alexis (annexe A). D'autres facteurs importants à la zone 2 étaient les effets hybride et année et l'interaction Année \times Site (tableau 12). L'interaction triple Année \times Site \times Hybride était également significative, ce qui indique que tous les effets ont eu un impact sur l'accumulation en DON (figure 8). On constate que la concentration en DON de chacun des hybrides a considérablement varié d'une année à l'autre et d'un site à l'autre. Par exemple, le comportement des hybrides 109, 108, 122 et 123 a varié entre les années et entre les sites. En 2011, la valeur de DON de l'hybride 109 était faible aux deux sites alors qu'en 2010, sa concentration en DON était extrêmement élevée au site de Saint-Alexis. En revanche, le contenu en DON de l'hybride 122 était faible en 2010 mais élevé en 2011 pour le même site de Saint-Alexis. Par contre, certains hybrides (125, 128, 136, 139 et 146) peuvent être identifiés comme étant les hybrides les plus résistants, peu importe les années et peu importe les sites (figure 8).

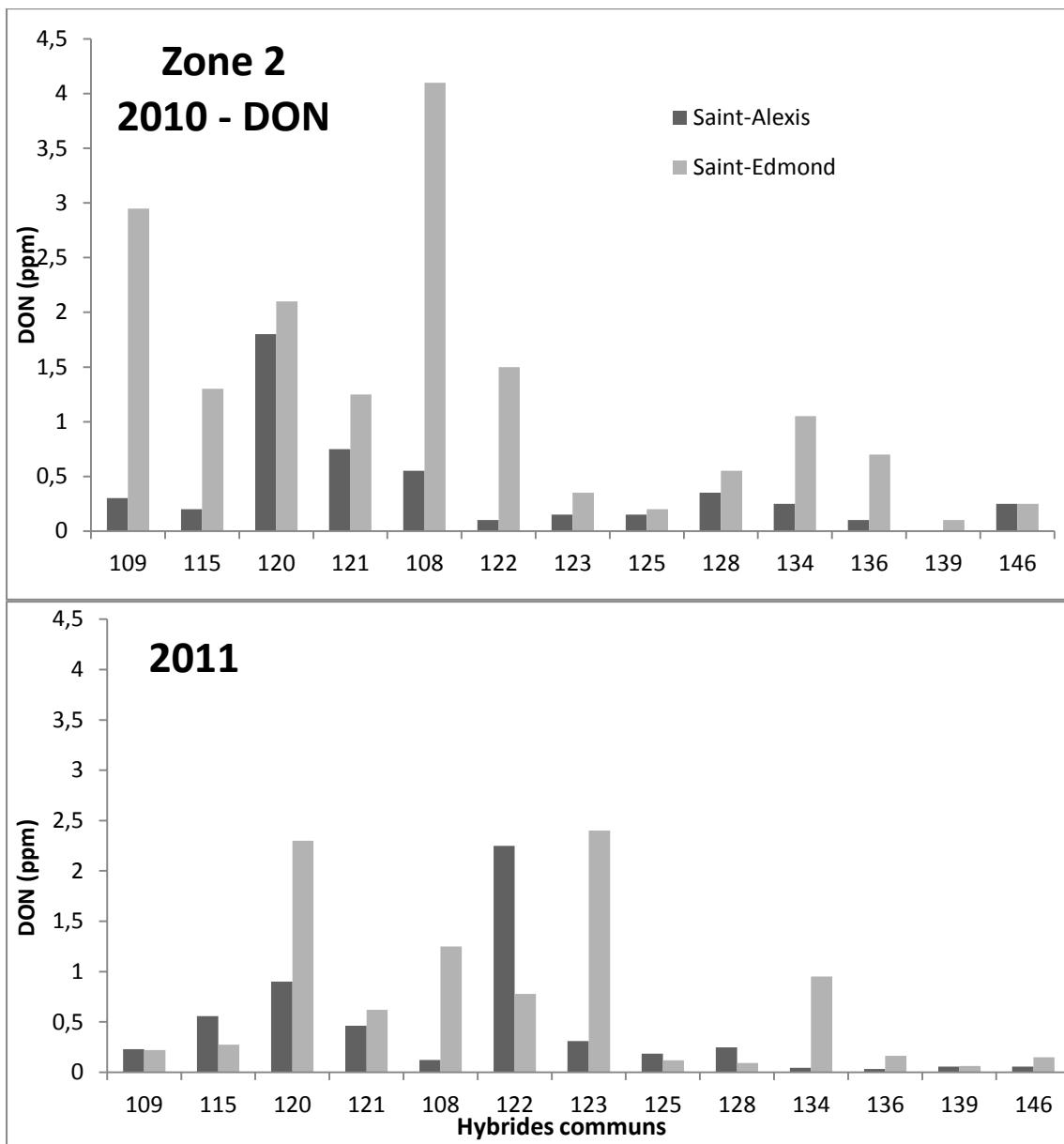


Figure 8. Concentration en DON des 13 hybrides de maïs-grain communs aux deux sites de Saint-Edmond et Saint-Alexis pour les deux années 2010 et 2011

Pour la zone 3, on constate que l'année a eu un impact majeur sur l'accumulation en DON ($F = 61,92$). La moyenne de DON pour toute la zone était significativement plus élevée en 2011 qu'en 2010 (tableau 12). Les concentrations plus élevées en DON observées en 2011 pourraient s'expliquer par les précipitations très importantes nettement au-dessus de la normale observées en août pour les trois sites. Pendant cette même période, les températures étaient similaires pour les deux années et les trois sites (annexe A). L'effet

Site était également significatif. Les concentrations moyennes en DON des sites de Saint-Albert et de Saint-Augustin étaient plus élevées que celles de Princeville. L'effet Hybride s'est également révélé significatif. On voit ces variations à la figure 9 où on illustre l'interaction triple entre les années, les sites et les hybrides. On constate que la concentration en DON a varié entre les hybrides ainsi que d'une année à l'autre et d'un site à l'autre. Ainsi le comportement des hybrides 195, 200 et 212 était assez variable selon l'année et selon le site. Par exemple, en 2010, l'hybride 200 avait une valeur de DON très basse à Saint-Augustin alors qu'en 2011 le même hybride avait une concentration très élevée de DON au même site. Par contre, le comportement de certains hybrides (189, 196, 202, 210 et 215) s'est révélé plus stable, peu importe l'année et peu importe le site (figure 9).

Quelques études ont été réalisées par voie d'infection naturelle ou par inoculation afin de vérifier les effets de l'année, du site et du choix de l'hybride sur le contenu en mycotoxines. Selon Vigier et coll. (2001) et Hooker et Schaafsma (2005), les concentrations en DON dépendent des conditions environnementales (année, site) et de l'hybride, ce qui concorde avec nos résultats. Cependant, d'après Hooker et Schaafsma (2005), le facteur le plus important relié à l'accumulation de DON est le choix de l'hybride, ce qui ne rejoint pas tout à fait nos résultats. Selon ces auteurs, 25 % des variations de cette toxine ont été expliqués par l'effet hybride ($P < 0,001$) pour l'ensemble des années. Par ailleurs, le facteur année expliquait 12 % et le facteur site expliquait de 9 à 38 % de la variation en DON en fonction de l'année.

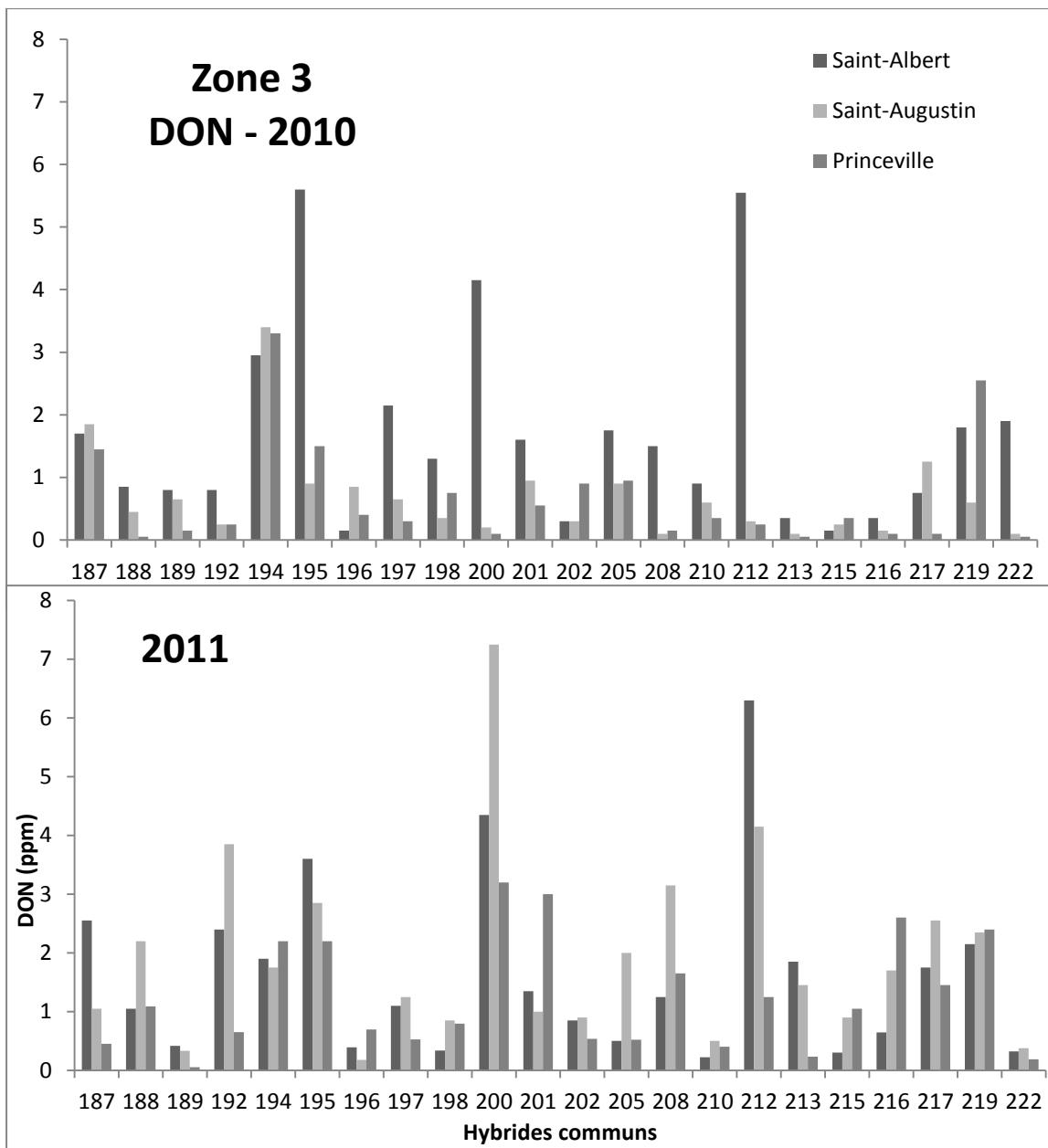


Figure 9. Concentration en DON provenant des 22 hybrides de maïs-grain communs aux trois sites de Saint-Albert, Saint-Augustin et Princeville pour les années 2010 et 2011

4.3.2.2 Contenus en T2, ZEN et FUM

Le tableau 13 présente l'ANOVA effectuée sur les concentrations en T2 des hybrides communs afin de vérifier les effets année, site et hybride. On constate que, dans la zone 1, il n'y a que l'année qui ait eu un effet sur cette toxine, avec une moyenne beaucoup plus élevée en 2011 qu'en 2010. L'accumulation en T2 est favorisée par des températures

modérément chaudes (optimum 20–25°C) et des conditions humides (Doohan et coll., 2003). Dans le cas de la zone 1, l'incidence la plus élevée de T2 a été observée en 2011 lorsque les précipitations étaient nettement au-dessus de la normale pour les deux sites au cours du mois d'août alors que les températures étaient similaires pour les deux années (annexe A). Pour la zone 2, aucun facteur n'a eu d'effet significatif sur la toxine T2 tandis que pour la zone 3, les effets année et site étaient significatifs (tableau 13). Dans cette dernière zone, l'incidence de T2 a été plus élevée en 2011 lorsque les précipitations étaient au-dessus de la normale pour l'ensemble des trois sites particulièrement au mois d'août. La température moyenne des trois sites était assez similaire en juillet et août au cours des deux années et toujours au-dessus de la moyenne de 30 ans (annexe A).

De plus, on observe que le site de Saint-Augustin affichait la concentration la plus élevée de T2 et que le site de Princeville avait la concentration la plus faible (tableau 13). Finalement, on peut retenir qu'il n'y a pas eu de différence significative de concentrations en T2 entre les hybrides. En effet, les résultats obtenus montrent que les valeurs de T2 sont globalement très basses.

Tableau 13. Concentrations en T2 des hybrides de maïs-grain communs dans les zones 1, 2 et 3 selon les années, les sites et les hybrides

Effets	Zone 1		Zone 2		Zone 3	
		T2 (ppb)		T2 (ppb)		T2 (ppb)
Année	2010	14	2010	44,3	2010	15,0
	2011	136	2011	30,1	2011	37,09
Site	BEL ^a	96	ALE	33,8	ALB	27,2
	HYA	54	EDM	40,6	AUG	42,3
					PRI	9,9
						b
Hybride	7 ^c	24	109	22,4	187	50,8
	11	101	115	33,2	188	8,7
	13	99	120	43,7	189	39,5
	15	54	121	84,2	192	43,6
	18	102	108	62,6	194	8,1
	19	123	122	32,9	195	37,4
	1	4	123	42,3	196	4,9
	3	73	125	6,9	197	15,4
	27	23	128	7,5	198	15,6
	32	13	134	98,1	200	12,4
	41	58	136	6,0	201	34,8
	43	32	139	16,0	202	20,2
	48	10	146	27,7	205	64,8
	49	117			208	11,6
	54	151			210	4,7
	55	19			212	77,4
	56	77			213	21,7
	59	311			215	27,6
	60	32			216	30,1
					217	14,9
					219	32,0
					222	6,0
Valeurs de <i>P</i>						
Année		0,002		ns		0,012
Site		ns ^d		ns		0,050
Année*Site		ns		ns		ns
Hybride		ns		ns		ns
Année*Hybride		ns		ns		ns
Site*Hybride		ns		ns		ns
Année*Site*Hybride		ns		ns		ns
Valeurs de <i>F</i>						
Année		49,59		4,10		12,73
Site		2,81		1,75		5,17
Année*Site		0,01		0,66		2,23
Hybride		1,32		1,73		1,48
Année*Hybride		0,82		0,89		1,57
Site*Hybride		1,38		0,81		1,19
Année*Site*Hybride		0,57		0,55		1,27

^aBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; HYA = Saint-Hyacinthe; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures; PRI = Princeville.

^bLes moyennes suivies de deux lettres identiques ne sont pas significativement différentes au seuil de $P < 0,05$.

^cChaque numéro correspond à un hybride différent.

^dns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

Le tableau 14 présente l'ANOVA effectuée sur les concentrations en ZEN des hybrides communs, afin de vérifier les effets de l'année, du site et des hybrides. On observe que pour la zone 1, seule l'interaction Année \times Site était significative. La concentration en ZEN était plus élevée au site de Saint-Mathieu-de-Beloeil comparativement au site de Saint-Hyacinthe en 2010 mais plus faible en 2011 (données non présentées). Pour la zone 2, les effets Site et l'interaction Année \times Site étaient significatifs, avec des concentrations en ZEN plus élevées à Saint-Alexis qu'à Saint-Edmond.

Pour la zone 3, malgré que la plupart des interactions aient été significatives, il n'y a que l'année ($F = 384,45$) qui ait eu un effet majeur sur les variations des concentrations en ZEN, avec des valeurs plus élevées en 2010 qu'en 2011 (tableau 14). Les températures moyennes des deux années étaient similaires et la moyenne des précipitations en 2010 était plus faible que celle de 2011 pour les trois sites (annexe A). Ces résultats semblent contredire l'affirmation que les années plus humides devraient entraîner des concentrations plus élevées en ZEN. Bien que variables, les valeurs de ZEN retrouvées dans notre étude étaient généralement très faibles, et les variations entre les traitements étaient peu importantes.

Tableau 14. Concentrations en ZEN des hybrides de maïs-grain communs pour les zones 1, 2 et 3 selon les années, les sites et les hybrides

Effets	Zone 1		Zone 2		Zone 3	
		ZEN (ppb)		ZEN (ppb)		ZEN (ppb)
Année	2010	50,4	2010	59,9	2010	62,3
	2011	43,2	2011	64,9	2011	0,1
Site	BEL ^a	45,4	ALE	86,9	ALB	39,4
	HYA	48,2	EDM	37,8	AUG	19,3
					PRI	34,9
Hybride	7 ^b	61,4	109	144,3	187	18,7
	11	39,0	115	58,9	188	8,4
	13	70,0	120	21,6	189	3,9
	15	10,4	121	34,3	192	8,4
	18	98,2	108	101,1	194	127,5
	19	59,8	122	24,8	195	50,4
	1	37,5	123	75,8	196	35,8
	3	48,3	125	48,6	197	1,2
	27	80,3	128	48,9	198	47,8
	32	26,1	134	44,3	200	9,1
	41	22,6	136	73,1	201	19,7
	43	12,5	139	36,5	202	10,3
	48	47,2	146	98,8	205	33,3
	49	77,3			208	32,4
	54	36,2			210	32,8
	55	25,4			212	62,7
	56	69,2			213	11,8
	59	40,9			215	16,4
	60	27,6			216	16,4
					217	8,6
					219	130,1
					222	0,4
Valeurs de P						
Année		ns ^c		ns		<0,001
Site		ns		0,014		ns
Année*Site		0,005		0,022		ns
Hybride		ns		ns		<0,001
Année*Hybride		ns		ns		<0,001
Site*Hybride		ns		ns		0,035
Année*Site*Hybride		ns		ns		0,039
Valeurs de F						
Année		0,23		5,29		384,45
Site		4,18		17,64		0,43
Année*Site		32,11		13,19		0,01
Hybride		0,97		0,47		3,79
Année*Hybride		0,88		0,83		3,04
Site*Hybride		0,59		1,15		1,54
Année*Site*Hybride		0,58		0,55		1,52

^aBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; HYA = Saint-Hyacinthe; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures; PRI = Princeville.

^bChaque numéro correspond à un hybride différent.

^cns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

Le tableau 15 présente l'ANOVA effectuée sur les concentrations en FUM des hybrides communs. On constate que dans la zone 1, les concentrations en FUM ont varié entre les années et les sites, avec une interaction entre ces deux facteurs. Globalement, la moyenne de FUM était plus élevée en 2011 qu'en 2010 et la concentration en FUM au site de Saint-Mathieu-de-Beloeil était plus élevée que celle au site de Saint-Hyacinthe. Le développement de *F. verticillioides* qui produit la FUM est favorisé par des températures supérieures à la normale (plus de 28°C) et des conditions sèches entre l'apparition des soies et le remplissage des grains (Miller et coll., 1995; Vigier et coll., 1997; de la Campa et coll., 2005).

Pour la zone 2, seul l'effet Site était significatif avec plus de FUM à Saint-Alexis qu'à Saint-Edmond (tableau 15). Selon les études d'Alma et coll. (2005) et de Papst et coll. (2005) en zones tempérées, la voie principale d'infection à *F. verticillioides* est réalisée par le biais de blessures dont celles d'insectes telle la pyrale du maïs. Cependant, comme nous n'avons pas d'information sur les dommages occasionnés par les insectes et oiseaux aux différents sites, il n'est pas possible de confirmer cette hypothèse.

Dans la zone 3, l'effet hybride et l'interaction triple étaient significatifs. Les valeurs de FUM étaient toutes généralement très faibles et les impacts potentiels de cette toxine devraient être plutôt négligeables.

Ces résultats paraissent être en contradiction avec ceux de Hooker et Schaafsma (2005) puisque ces auteurs ont démontré que l'accumulation en FUM dans le maïs-grain est principalement associée à l'effet hybride, avec 25 % de la variation de cette toxine expliquée par l'hybride, alors que ce pourcentage était de 19 % et de 3 à 19 % pour les effets année et site, respectivement. Néanmoins, cette étude a également conclu que puisque les contenus en FUM étaient faibles, les données sur cette toxine étaient insuffisantes pour tester l'hypothèse de l'effet hybride sur la FUM. On remarquera que les effets significatifs des facteurs année, site et hybride sur la fumonisine ont été observés dans des pays avec des conditions environnementales chaudes et sèches comme en Argentine et aux Philippines (de la Campa et coll., 2005).

Tableau 15. Concentrations en FUM des hybrides de maïs-grain communs pour les zones 1, 2 et 3 selon les années, les sites et les hybrides

Effets	Zone 1		Zone 2		Zone 3	
		FUM (ppm)		FUM (ppm)		FUM (ppm)
Année	2010	0,18	2010	0,30	2010	0,08
	2011	0,84	2011	0,20	2011	0,06
Site	BEL ^a	0,84	ALE	0,48	ALB	0,10
	HYA	0,17	EDM	0,03	AUG	0,04
					PRI	0,07
Hybride	7 ^b	1,71	109	0,30	187	0,04
	11	0,23	115	0,31	188	0,03
	13	0,21	120	0,03	189	0,05
	15	0,35	121	0,60	192	0,03
	18	0,46	108	0,66	194	0,29
	19	0,46	122	0,18	195	0,09
	1	0,03	123	0,00	196	0,04
	3	0,68	125	0,00	197	0,03
	27	1,09	128	0,78	198	0,03
	32	0,04	134	0,03	200	0,04
	41	1,21	136	0,03	201	0,12
	43	1,45	139	0,00	202	0,02
	48	0,04	146	0,35	205	0,33
	49	0,61			208	0,18
	54	0,25			210	0,02
	55	0,01			212	0,01
	56	0,30			213	0,01
	59	0,19			215	0,01
	60	0,30			216	0,09
					217	0,03
					219	0,03
					222	0,04
Valeurs de <i>P</i>						
Année		0,053		ns		ns
Site		0,026		0,010		ns
Année*Site		0,043		ns		ns
Hybride		ns ^c		ns		0,052
Année*Hybride		ns		ns		ns
Site*Hybride		ns		ns		ns
Année*Site*Hybride		ns		ns		0,047
Valeurs de <i>F</i>						
Année		7,36		1,37		0,81
Site		11,95		20,70		1,48
Année*Site		8,63		0,04		1,33
Hybride		1,25		1,77		1,63
Année*Hybride		0,66		1,50		1,00
Site*Hybride		0,55		1,45		1,07
Année*Site*Hybride		0,38		1,89		1,49

^aBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; HYA = Saint-Hyacinthe; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures; PRI = Princeville.

^bChaque numéro correspond à un hybride différent.

^cns = non significatif au seuil de *P* > 0,05.

4.3.2.3 Conclusions

Les ANOVA sur les concentrations en mycotoxines des hybrides communs aux deux années (2010 et 2011) nous permettent de conclure que, pour chacune des zones, l'année, le site et l'interaction entre ces deux facteurs avaient de grandes influences sur l'accumulation de chacune des quatre mycotoxines évaluées. Ces résultats concordent avec des études précédentes qui démontrent que les concentrations en mycotoxines dépendent principalement des conditions environnementales (Vigier et coll., 2001; de la Campa et coll., 2005).

Le facteur hybride avait un effet significatif sur les concentrations en DON, mais cet effet était moins important pour les autres mycotoxines (T2, ZEN et FUM); ces trois toxines ayant fluctué légèrement selon les hybrides de chacune des zones et à chaque année. Les accumulations de T2, ZEN et FUM rapportées pour l'est du Canada sont généralement faibles (Campbell et coll., 2002), ce qui concorde avec nos résultats. Nos résultats sont également en accord avec les résultats des études de Vigier et coll. (2001) et de Hooker et Schaafsma (2005) qui indiquent que l'hybride a un effet significatif sur le contenu en DON. En revanche, nos résultats n'ont pas concordé avec des études précédentes indiquant que le choix de l'hybride peut avoir un effet sur la concentration en FUM (de la Campa et coll., 2005; Hooker et Schaafsma, 2005). De plus, dans notre expérience, l'effet année (effet des conditions météorologiques) était souvent plus grand que l'effet hybride, ce qui est en contradiction avec les travaux de Vigier et coll. (2001) et de Hooker et Schaafsma (2005), mais en accord avec les travaux de la Campa et coll. (2005).

4.3.3 Évaluation des effets de l'année, du site et de la zone sur les concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN, FUM) en créant une variable commune

Étant donné que les hybrides sont différents d'une année à l'autre et d'une zone à l'autre, on a créé une variable commune à tous en faisant les moyennes des concentrations pour chaque mycotoxine de tous les hybrides pour chaque site/année, pour chacun des deux blocs présents sur chaque site. On obtient ainsi deux données (2 blocs) par site/année. Les sites sont par la suite comparés par groupe (équivalent à chaque zone) à l'aide de contrastes, ce qui nous permet de conclure sur l'effet zone.

4.3.3.1 Contenus en DON

Le tableau 16 présente l'ANOVA effectuée sur les concentrations moyennes en DON de tous les hybrides pour vérifier les effets de l'année et du site ainsi que l'effet de la zone par le biais de contrastes a priori.

L'année a eu un effet majeur avec une concentration moyenne de DON plus élevée en 2011 (1,10 ppm) que celle observée en 2010 (0,78 ppm). L'effet du site était également significatif. On observe qu'en 2010, les concentrations en DON étaient significativement supérieures aux sites de Saint-Edmond et de Saint-Albert par rapport aux autres sites. En 2011, les trois sites de la zone 3 (Saint-Augustin, Saint-Albert et Princeville) de même que le site de Saint-Hyacinthe avaient des concentrations en DON dépassant 1 ppm. Par contre, le site de Sainte-Martine et les deux sites de la zone 2 (Saint-Alexis et Saint-Edmond) avaient des concentrations faibles en DON. L'interaction Année × Site était également significative et le comportement du site a varié selon l'année. Par exemple, pour le site de Saint-Edmond, la concentration en DON était plus élevée en 2010 (1,15 ppm) qu'en 2011 (0,57 ppm). Parmi les 7 sites évalués en 2010 et les 8 sites en 2011, le site de Saint-Albert avait une concentration élevée en DON au cours des deux années 2010 et 2011. Bien que les conditions météorologiques et géographiques aient eu un effet majeur sur cette accumulation, d'autres facteurs, comme les pratiques culturales (précédent cultural, travail du sol et etc.), qui sont principalement associés à l'effet site, ont aussi pu jouer un rôle sur l'augmentation en DON. Il est possible que la nature du précédent cultural (maïs) sous travail réduit utilisé au cours des deux années au site de Saint-Albert ait pu contribuer aux concentrations plus élevées en DON sur ce site.

Les contrastes entre les zones montrent qu'en 2010, les concentrations en DON étaient globalement plus élevées dans les zones 2 et 3 (0,77 et 0,96 ppm, respectivement) que dans la zone 1 (0,53 ppm) (tableau 16). En 2011, les concentrations en DON étaient significativement différentes entre les trois zones. La concentration en DON était la plus élevée dans la zone 3 (1,73 ppm). En 2011, les précipitations ont été très importantes au mois d'août dans toutes les zones, c'est-à-dire nettement au-dessus de la moyenne de 30 ans (annexe A). En comparaison aux autres zones, la zone 3 a enregistré des précipitations près de la normale pour le mois de juillet alors que les précipitations ont été plus faibles pour ce

mois dans toutes les autres zones. La zone 3 a donc enregistré pendant deux mois consécutifs (juillet et août) des précipitations qui ont pu favoriser des conditions humides favorables au développement du champignon et ainsi entraîner des concentrations plus élevées en mycotoxines.

Tableau 16. Concentration moyenne en DON des hybrides de maïs-grain selon les années, les zones et les sites en tenant compte d'une variable commune^a

Année	Zone	Site	DON	
			(ppm)	
2010	1	BEL ^b	0,56	b ^c
		HYA	0,50	b
	2	ALE	0,38	b
		EDM	1,15	a
	3	AUG	0,65	b
		ALB	1,56	a
		PRI	0,66	b
2011	1	BEL	0,92	de
		HYA	1,26	cd
		MAR	0,39	f
	2	ALE	0,45	f
		EDM	0,57	ef
	3	AUG	1,95	a
		ALB	1,81	ab
		PRI	1,43	bc
Valeurs de <i>P</i>				
Année <0,001				
Site <0,001				
Année*Site <0,001				
Valeurs de <i>F</i>				
Année 27,21				
Site 16,41				
Année*Site 8,03				
Contrastes				
Zone 1 vs zone 2: année 2010 <0,001				
Zone 1 vs zone 3: année 2010 0,007				
Zone 2 vs zone 3: année 2010 ns ^d				
Zone 1 vs zone 2: année 2011 0,027				
Zone 1 vs zone 3: année 2011 <0,001				
Zone 2 vs zone 3: année 2011 <0,001				

^aVariable commune: valeurs moyennes de mycotoxine pour tous les hybrides.

^bBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; HYA = Saint-Hyacinthe; MAR = Sainte-Martine; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures; PRI = Princeville.

^cLes moyennes suivies de deux lettres identiques ne sont pas significativement différentes au seuil de $P < 0,05$ pour une même année.

^dns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

4.3.3.2 Contenus en T2, ZEN et FUM

Les concentrations moyennes en T2 de tous les hybrides sont présentées au tableau 17. L'année a eu un effet majeur; la concentration moyenne de T2 en 2011 (59,5 ppb) était significativement plus élevée que celle de 2010 (22,5 ppb).

L'interaction Année × Site était également significative, il y a donc eu des variations de concentrations de toxine aux différents sites selon les années. Par exemple, au site de Saint-Alexis, la concentration en T2 était beaucoup plus élevée en 2011 (180,5 ppb) qu'en 2010 (27,3 ppb). Les contrastes entre les zones montrent qu'en 2010, les concentrations en T2 étaient statistiquement différentes entre la zone 2 et la zone 3 bien que la moyenne de la zone 2 (20,2 ppb) n'ait été que peu différente de celle de la zone 3 (18,4 ppb). En 2011, les concentrations en T2 étaient significativement plus faibles dans la zone 1 (44,1 ppb) par rapport à la zone 2 (102,4 ppb) et la zone 3 (46,5 ppb). Cependant, l'analyse par contraste n'a pas révélé de différence significative entre la zone 2 et la zone 3. Finalement, on constate que les valeurs de T2 étaient globalement faibles et les effets pourraient donc être considérés comme négligeables sur la qualité des grains. La valeur la plus élevée (180,5 ppb) observée au site de Saint-Alexis est tout de même bien en-dessous de la valeur de 1000 ppb proposée comme seuil maximum pour la production porcine.

Tableau 17. Concentration moyenne en T2 des hybrides de maïs-grain selon les années, les zones et les sites en tenant compte d'une variable commune^a

Année	Zone	Site	T2 (ppb)		
2010	1	BEL ^b	12,2	b ^c	
		HYA	49,8	a	
	2	ALE	27,3	ab	
		EDM	13,0	b	
	3	AUG	31,0	ab	
		ALB	18,9	ab	
		PRI	5,2	b	
2011	1	BEL	39,6	cd	
		HYA	36,7	cd	
		MAR	55,9	bc	
	2	ALE	180,5	a	
		EDM	24,2	cd	
	3	AUG	75,6	b	
		ALB	48,3	bcd	
		PRI	15,5	d	
Valeurs de <i>P</i>					
Année <0,001					
Site <0,001					
Année*Site <0,001					
Valeurs de <i>F</i>					
Année 39,63					
Site 9,89					
Année*Site 14,35					
Contrastes					
Zone 1 vs zone 2: année 2010 ns ^d					
Zone 1 vs zone 3: année 2010 ns					
Zone 2 vs zone 3: année 2010 0,027					
Zone 1 vs zone 2: année 2011 <0,001					
Zone 1 vs zone 3: année 2011 <0,001					
Zone 2 vs zone 3: année 2011 ns					

^a Variable commune: valeurs moyennes de mycotoxine pour tous les hybrides.

^bBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; HYA = Saint-Hyacinthe; MAR = Sainte-Martine; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures; PRI = Princeville.

^cLes moyennes suivies de deux lettres identiques ne sont pas significativement différentes au seuil de $P < 0,05$ pour une même année.

^dns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

Les concentrations moyennes en ZEN des hybrides sont présentées au tableau 18 selon les effets de l'année, de la zone et du site. L'année a eu un effet significatif et majeur sur la production de cette toxine avec une concentration plus élevée de ZEN en 2010 qu'en 2011. L'interaction Année \times Site indique des contaminations en ZEN différentes en fonction des sites et d'une année à l'autre. Par exemple, pour les sites de Saint-Mathieu-de-Beloeil et Princeville, les contenus en ZEN étaient parmi les plus élevés en 2010 (65,9 et 76,6 ppb, respectivement) alors qu'ils étaient parmi les plus bas en 2011 (0,1 ppb). Les contrastes pour tester l'effet des zones pour la toxine ZEN montrent qu'il n'y avait globalement pas de différences significatives entre les zones en 2010. En 2011, la zone 3 (12,9 ppb) s'est différenciée de la zone 1 (26,6 ppb) et de la zone 2 (34,3 ppb). De manière générale, on peut conclure que les valeurs de ZEN étaient relativement faibles.

Tableau 18. Concentration moyenne en ZEN des hybrides de maïs-grain selon les années, les zones et les sites en tenant compte d'une variable commune^a

Année	Zone	Site	ZEN (ppb)		
2010	1	BEL ^b	65,9	ab ^c	
		HYA	51,1	ab	
	2	ALE	27,7	b	
		EDM	25,8	b	
2011	3	AUG	66,7	ab	
		ALB	70,3	ab	
		PRI	76,6	a	
	1	BEL	0,1	c	
		HYA	79,6	a	
		MAR	0,1	c	
2011	2	ALE	52,3	ab	
		EDM	16,2	bc	
	3	AUG	14,6	bc	
		ALB	23,9	bc	
		PRI	0,1	c	
Valeurs de <i>P</i>					
Année <0,001					
Site ns ^d					
Année*Site 0,012					
Valeurs de <i>F</i>					
Année 15,59					
Site 1,76					
Année*Site 4,14					
Contrastes					
Zone 1 vs zone 2: année 2010 ns					
Zone 1 vs zone 3: année 2010 ns					
Zone 2 vs zone 3: année 2010 ns					
Zone 1 vs zone 2: année 2011 ns					
Zone 1 vs zone 3: année 2011 0,027					
Zone 2 vs zone 3: année 2011 0,003					

^aVariable commune: valeurs moyennes de mycotoxine pour tous les hybrides.

^bBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; HYA = Saint-Hyacinthe; MAR = Sainte-Martine; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures; PRI = Princeville.

^cLes moyennes suivies de deux lettres identiques ne sont pas significativement différentes au seuil de $P < 0,05$ pour une même année.

^dns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

L'analyse de variance effectuée sur les concentrations moyennes en FUM des hybrides a démontré que seul le site a eu un effet significatif (tableau 19). Les moyennes des sites pour les deux années montrent que le site de Saint-Alexis (0,58 ppm) et de Saint-Albert (0,71 ppm) avaient les concentrations les plus élevées en FUM alors que Princeville (0,04 ppm) et Sainte-Martine (0,03 ppm) avaient le moins de FUM. Les contrastes nous indiquent qu'il n'y avait globalement pas de différences significatives entre les zones en 2010. En 2011 la zone 1 (0,23 ppm) s'est différenciée de la zone 2 (0,58 ppm) et de la zone 3 (0,52 ppm) avec une concentration moyenne significativement plus basse. Cependant on retiendra que globalement l'incidence de la fumonisine était faible quelle que soit la zone.

Tableau 19. Concentration moyenne en FUM des hybrides de maïs-grain selon les années, les zones et les sites en tenant compte d'une variable commune^a

Année	Zone	Site	FUM (ppm)	
2010	1	BEL ^b	0,11	a ^c
		HYA	0,35	a
	2	ALE	0,02	a
		EDM	0,41	a
2011	1	AUG	0,05	a
		ALB	0,13	a
		PRI	0,06	a
	2	BEL	0,22	b
		HYA	0,43	b
		MAR	0,03	b
	3	ALE	1,15	a
		EDM	0,00	b
		AUG	0,23	b
		ALB	1,29	a
		PRI	0,03	b
Valeurs de <i>P</i>				
Année				
Site				
Année*Site				
Valeurs de <i>F</i>				
Année				
Site				
Année*Site				
Contrastes				
Zone 1 vs zone 2: année 2010				
Zone 1 vs zone 3: année 2010				
Zone 2 vs zone 3: année 2010				
Zone 1 vs zone 2: année 2011				
Zone 1 vs zone 3: année 2011				
Zone 2 vs zone 3: année 2011				

^aVariable commune: valeurs moyennes de mycotoxine pour tous les hybrides.

^bBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; HYA = Saint-Hyacinthe; MAR = Sainte-Martine; ALE = Saint-Alexis-de-Montcalm; EDM = Saint-Edmond-de-Grantham; ALB = Saint-Albert; AUG = Saint-Augustin-de-Desmaures; PRI = Princeville.

^cLes moyennes suivies de deux lettres identiques ne sont pas significativement différentes au seuil de $P < 0,05$ pour une même année.

^dns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

4.3.4 Effet de la maturité physiologique et du site sur les contenus en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) des hybrides de maïs-grain en 2009

Pour tester les effets de la maturité et du site, une ANOVA sur une variable commune aux hybrides de l'année 2009 a été effectuée pour chacune des quatre mycotoxines (tableau 20). Étant donné que les hybrides étaient différents selon les sites et selon leur maturité, on a créé une variable commune à tous en faisant la moyenne de la concentration de chacune des mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) des hybrides, pour chacun des deux blocs de chacun des deux essais (hâtifs et tardifs) de chaque site (Saint-Mathieu-de-Beloeil et Princeville). On obtient ainsi deux données (2 blocs) par essai. Ces résultats ont été pris seulement pour l'année 2009 puisqu'en 2010 et 2011, seuls les essais tardifs ont été récoltés.

Au tableau 20, on constate que l'effet de la maturité était significatif seulement pour la toxine de DON. Les hybrides tardifs avaient significativement moins de DON que les hybrides hâtifs. Ce résultat semble être en contradiction avec de précédentes études qui précisent que les hybrides tardifs tendent à avoir une plus grande accumulation en DON (Reid et Sinha, 1998; Lauren et coll., 2007). Une cause possible de cette différence observée à partir de nos résultats pourrait provenir des dates de récolte des hybrides hâtifs qui étaient très proches des dates de récolte des hybrides tardifs (tableau 3). En conséquence, un retard dans la date de récolte pourrait faire augmenter les concentrations en DON (Reid et Sinha, 1998; Lauren et coll., 2007). Aucun effet de la maturité n'a été observé pour les trois mycotoxines T2, ZEN et FUM dont les concentrations étaient très basses en 2009. Cependant, des études réalisées par Lauren et coll. (2007) ainsi que par Blandino et Reyneri (2010) ont démontré qu'un hybride tardif peut montrer une plus forte contamination en ZEN dans les hybrides de maïs-grain.

Toutefois, il est difficile de comparer ce résultat à ceux obtenus lors de notre étude. Premièrement, les études de Lauren et coll. (2007) et de Blandino et Reyneri (2010) ont été réalisées en Italie et en Nouvelle-Zélande, respectivement. Les conditions environnementales étaient donc très différentes de celles du Québec. Deuxièmement, le nombre des hybrides évalués dans ces deux études était très petit par rapport au nombre d'hybrides testés dans notre projet.

Les seules études réalisées au Canada ont été faites sous inoculations artificielles (Reid et coll., 1996; Reid et Sinha, 1998). Elles ont démontré que les concentrations en DON ne sont pas affectées par la maturité physiologique des hybrides. Par conséquent, il serait nécessaire de reprendre davantage d'études en conditions d'infection naturelle afin d'avoir une idée globale de l'effet de la maturité sur les mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) dans la culture de maïs-grain dans l'est du Canada et en particulier au Québec.

Par ailleurs, on observe que le site a eu un effet significatif sur l'accumulation en DON et en T2. Le site de Princeville était plus favorable pour la production en DON et en T2 que celui de Saint-Mathieu-de-Beloeil (tableau 20). Les conditions météorologiques pourraient expliquer ces différences. En effet, les données météorologiques montrent que la température moyenne à Princeville était de 18,1°C avec des précipitations relativement fortes (442,6 mm) au cours des mois de juin à août alors qu'à Saint-Mathieu-de-Beloeil, la température moyenne était de 19,2°C avec des précipitations de 295,5 mm. En général, la production de *F. graminearum* est favorisée par des conditions humides avec des précipitations abondantes au cours de la période critique de l'apparition des soies et de la maturation (de juillet à la fin août) (Sutton et coll., 1980; Sutton, 1982; Miller et coll. 1995). De même, l'accumulation en T2 est favorisée par les températures modérées et des conditions humides (Doohan et coll., 2003).

Tableau 20. ANOVA sur une variable commune^a aux hybrides de maïs-grain de l'année 2009 pour vérifier les effets de la maturité et du site, pour chacune des quatre mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM)

Maturité	Site ^b	DON	T2	ZEN	FUM
		(ppm)	(ppb)	(ppb)	(ppm)
	BEL	0,16	b ^c	3,8	b
	PRI	0,66	a	41,4	a
Hâtifs		0,53	a	25,8	15,8
Tardifs		0,29	b	19,4	5,1
Valeurs de P					
	Site	0,005	0,029	ns	ns
	Maturité	0,051	ns	ns	ns
	Site*Maturité	ns ^d	ns	ns	ns

^aVariable commune: valeurs moyennes de mycotoxine pour tous les hybrides.

^bBEL = Saint-Mathieu-de-Beloeil; PRI = Princeville.

^cLes moyennes suivies de deux lettres identiques ne sont pas significativement différentes au seuil de $P < 0,05$.

^dns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

4.3.5 Régressions

Des régressions linéaires ont été établies entre la maturité physiologique ainsi que la présence visuelle de champignons et les concentrations des quatre toxines au cours des années 2009, 2010 et 2011, pour chacune des trois zones de production (tableau 21). Les concentrations en mycotoxines ont fluctué selon les années et selon les zones. Les coefficients de régression linéaire liant les variables et les concentrations en mycotoxines ont toujours été très faibles et ont varié de 0,00 à 0,07. Par conséquent, la maturité physiologique des hybrides ne semble pas être une mesure permettant d'expliquer ou de prédire adéquatement les différences observées dans les concentrations des quatre toxines. Nos résultats sont en accord avec l'étude réalisée par Blandino et Reyneri (2010) pour la toxine FUM et les études de Reid et coll. (1996) et Reid et Sinha (1998) pour le DON, indiquant que la maturité n'était pas corrélée avec ces deux toxines. En revanche, Blandino et Reyneri (2010) rapportent que les contenus en ZEN ont augmenté significativement pour les hybrides tardifs et qu'ils étaient corrélés avec la maturité. Toutefois cette étude a été réalisée en Italie où le climat est très différent du Québec, ce qui implique des différences importantes pour la période de maturation. Finalement, aucune étude n'a été réalisée auparavant sur la relation entre la maturité des hybrides et le contenu en T2.

De plus, nos résultats indiquent que la présence visuelle de champignons sur les épis du maïs-grain ne peut pas être utilisée pour prédire correctement les différences observées dans les concentrations des quatre toxines. D'après Dorn et coll. (2011), en condition d'infection naturelle, l'évaluation de symptômes visuels de maladie ne permet pas de conclure quant à la présence des espèces *Fusarium* ou des mycotoxines (DON, FUM et ZEN). Par contre, d'autres études effectuées avec inoculation artificielle ont montré une bonne corrélation entre les évaluations des symptômes visuels et les concentrations de mycotoxines (DON et FUM) chez les hybrides de maïs (Reid et coll., 1996; Stewart et coll., 2002; Clements et coll., 2004). Finalement, selon de la Campa et coll. (2005), l'infection par *F. verticillioides*, associée à la toxine FUM, n'entraîne pas toujours de symptômes visibles de la fusariose de l'épi et du grain sur les hybrides de maïs-grain. Cela concorde avec l'absence de relation observée dans notre étude entre cette toxine et les symptômes visuels.

Tableau 21. Coefficients de régression linéaire entre les concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) et la présence visuelle de champignon et la maturité physiologique des hybrides de maïs-grain pour les zones 1, 2 et 3 et les années 2009, 2010 et 2011

Mycotoxine	Année	Présence visuelle de champignon			Maturité physiologique		
		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 1	Zone 2	Zone 3
DON	2009	0,02*	-	0,05***	0,006 ns ^a	-	0,02*
	2010	0,002 ns ^a	0,005 ns	0,003 ns	0,008 ns	0,01 ns	0,07***
	2011	0,011 ns	0,0005 ns	0,017 ns	0,008 ns	0,001 ns	0,00 ns
T2	2009	0,009 ns	-	0,02*	0,001 ns	-	0,004 ns
	2010	0,001 ns	0,0004 ns	0,01 ns	0,0002 ns	0,00 ns	0,01 ns
	2011	0,008 ns	0,008 ns	0,04**	0,002 ns	0,02*	0,007 ns
ZEN	2009	0,019*	-	0,02*	0,03**	-	0,00 ns
	2010	0,004 ns	0,001 ns	0,004 ns	0,0005 ns	0,01 ns	0,008 ns
	2011	0,002 ns	0,02*	0,02*	0,0004 ns	0,007 ns	0,005 ns
FUM	2009	0,002 ns	-	0,001 ns	0,003 ns	-	0,0004 ns
	2010	0,01 ns	0,01 ns	0,001 ns	0,0006 ns	0,0007 ns	0,006 ns
	2011	0,04***	0,06***	0,06 ns	0,001 ns	0,04**	0,0004 ns

* = Significatif à $P \leq 0,05$

** = Significatif à $P \leq 0,01$

*** = Significatif à $P \leq 0,001$

^ans = non significatif

4.3.6 Conclusions

Selon les résultats de cette expérience, le désoxynivalénol (DON) est la toxine la plus répandue parmi les quatre toxines évaluées dans les zones climatiques du Québec. Une proportion importante des hybrides évalués avait une concentration inférieure à 1 ppm (de 30 à 100 % des hybrides selon les sites et les années). Les concentrations des trois autres toxines, T2, ZEN et FUM n'étaient pas élevées, la majorité des hybrides avaient des contenus sous les seuils recommandés pour la production porcine de ces trois toxines (de 95 à 100 %). Par conséquent, on peut prétendre que la qualité des hybrides de maïs-grains évalués était généralement bonne.

Les résultats de l'année 2009 sur les essais hâtifs et tardifs montrent que la maturité physiologique a eu un effet significatif sur la toxine DON. Les hybrides hâtifs ont eu un niveau plus élevé de DON par rapport aux hybrides tardifs. En général, le contenu en DON peut varier en fonction des conditions météorologiques, d'une année à l'autre, d'un site à l'autre ainsi que d'une zone à l'autre. En effet, les conditions climatiques (année, site, zone) jouent un très grand rôle sur l'accumulation de DON au Québec. Cependant, le facteur site peut également être associé aux pratiques culturales (précédent cultural, travail du sol, etc.).

Les résultats démontrent aussi que l'année 2011 et particulièrement la zone 3 (2300 à 2500 UTM) étaient caractérisées par des conditions plus favorables au développement de la fusariose de l'épi et la production de toxine DON au cours de la période critique de l'apparition des soies et de la maturation des grains (juillet-août). De plus, le facteur hybride peut également avoir une influence sur le contenu en DON, ce qui confirme le fait que le choix d'un hybride résistant à la fusariose de l'épi pourrait fortement réduire le contenu de cette toxine.

Pour les trois autres toxines (T2, ZEN et FUM), leurs valeurs ont été généralement plus faibles et donc l'effet des facteurs hybride, site, zone et année était négligeable. Cependant, on a pu observer un faible effet de l'année et du site pour la toxine ZEN. Les coefficients de régression entre la maturité physiologique ainsi que la présence visuelle de champignons et les concentrations des quatre toxines (DON, T2, ZEN et FUM) ont été très faibles. Par conséquent, la maturité physiologique des hybrides ne semble pas être une mesure permettant d'expliquer ou de prédire adéquatement les différences observées dans les concentrations des quatre toxines.

5. Effet de l'application de fongicide foliaire sur les concentrations en DON, T2, ZEN et FUM du maïs-grain

5.1 Introduction

Des fongicides sont des produits chimiques qui sont appliqués pour lutter contre la croissance des champignons. Le seul fongicide homologué pour le maïs-grain, contre les *Fusarium spp.* est le prothioconazole (SAgE pesticides, 2013). Par contre, au cours de la dernière décennie, l'utilisation des fongicides foliaires a considérablement augmenté pour le maïs-grain, afin de pouvoir contrôler les maladies foliaires et ainsi augmenter les rendements (Munkvold et coll., 2008; Hooker et coll., 2009). Par conséquent, il est intéressant de vérifier l'effet de traitements de fongicides foliaires sur la fusariose de l'épi et sur l'accumulation des mycotoxines. La présente étude a donc pour objectif d'évaluer l'effet de l'application d'un fongicide foliaire sur les concentrations en DON, T2, ZEN et FUM du maïs-grain.

5.2 Matériel et méthodes

5.2.1 Mise en place des essais et prise de données

Cette étude a été mise en place à deux sites expérimentaux, soit à Saint-Mathieu-de-Beloeil, QC, Canada (Lat. 45°34' N, Long 73°12' O; 2700 à 2900 UTM) et à L'Assomption, QC, Canada (Lat. 45°48' N, Long 73°26' O; 2500 à 2700 UTM) au cours des trois années 2009, 2010 et 2011. Les données météorologiques sont présentées à l'annexe A. Les données de l'Assomption provenaient de la station d'Environnement Canada située le plus près de ce site expérimental, tandis que les données de Saint-Mathieu-de-Beloeil provenaient de la station météo du CÉROM. Les sols des deux sites étaient des loam argileux. Sur un précédent cultural de soya, un travail conventionnel (labour) a été exécuté sur les deux sites au cours des trois années de l'étude.

Sur chaque site, le dispositif était un essai factoriel de type split-plot avec en parcelles principales, l'application ou non du fongicide et, en sous-parcelles, 24 hybrides de maïs-grain de six compagnies différentes, le tout étant répété deux fois. Les parcelles pour chacun des hybrides étaient constituées de deux rangs de 6 m de longueur espacés de 76 cm et sur lesquels l'espacement moyen entre les plants était de 17 cm. On obtenait un total de

96 parcelles par site et un total de 192 échantillons pour les deux sites au cours de chacune des années. Un rang de 6 m possédait 36 plants et la population finale était de 74360 plants/ha en 2009 et 2010, et de 79070 plants/ha en 2011.

Aux deux sites, la fertilisation en engrais azoté sous forme d'urée a été faite avant le semis pour un total de 170 kg N/ha. L'apport en phosphore et en potassium a été ajusté selon les analyses de sol pour les deux sites et les trois années (tableau 22). Les herbicides étaient du Dual II Magnum (1,75 l/ha) et du Marksman (4,5 l/ha) appliqués en prélevée sur tous les sites et les années.

Les dates de semis pour les deux sites et les trois années sont présentées au tableau 22. Le fongicide Headline dont la matière active est la pyraclostrobine (250 g/L) a été appliqué au taux de 0,4 L/ha au stade de mi-floraison du maïs (7 à 10 jours après l'initiation de la floraison). Le fongicide a été appliqué par voie terrestre avec un applicateur modifié monté sur un tracteur. Les récoltes des hybrides de maïs grain ont été faites tel que présenté au tableau 22. Lors de la récolte de maïs-grain, un échantillon représentatif de chaque parcelle d'environ 500 g a été prélevé et séché. Des informations supplémentaires concernant l'échantillonnage des grains sont disponibles à la section « Matériels et Méthodes » du chapitre 4. Nous avons recueilli un total de 576 échantillons de maïs-grain, soit 192 échantillons pour chacune des années.

Tableau 22. Date de semis et de récolte et fertilisation appliquée aux sites de Saint-Mathieu-de-Beloeil et de L'Assomption pour les années 2009, 2010 et 2011

Site	Année	Date de semis	Date de récolte	Analyse de sol			Engrais appliqués (kg/ha)		
				P	K	pH	N	P	K
Saint-Mathieu-de-Beloeil	2009	4 mai	28 oct.	123	101 0	7,0	170	35	0
	2010	5 mai	26 oct.	55	822	7,0	170	70	0
	2011	13 mai	25 oct.	122	102 0	7,6	170	60	0
L'Assomption	2009	30 avril	30 oct.	221	320	7,3	170	40	40
	2010	12 mai	30 oct.	275	475	6,9	170	40	40
	2011	25 mai	23 oct.	210	305	7,1	170	40	40

5.2.2 Analyses de mycotoxines

Dans ce projet, on a utilisé le test ELISA pour mesurer la concentration des quatre mycotoxines DON, T2, ZEN et FUM avec des trousse de tests quantitatifs Veratox (corporation NEOGEN). Des informations supplémentaires concernant les analyses de laboratoire sont disponibles à la section « Matériel et méthodes » du chapitre 4. Dans cette expérience, au total 2304 analyses des quatre mycotoxines ont été effectuées.

5.2.3 Analyse statistiques

Les données ont été analysées en utilisant la procédure PROC MIXED du logiciel statistique SAS (SAS Institute, 2003). Les traitements année, site, fongicide et hybrides ont été considérés en facteur fixe alors que les deux répétitions ont été considérées en facteur aléatoire. Les données brutes ont été transformées au besoin (transformation logarithmique des concentrations en mycotoxines des hybrides). La normalité des données a été évaluée avec la procédure UNIVARIATE tandis que l'homogénéité de la variance a été vérifiée visuellement avec le graphique des résidus (SAS Institute, 2003). La signification statistique a été postulée à $P \leq 0,05$.

5.3 Résultats et discussion

L'application du fongicide foliaire Headline (pyraclostrobine) n'a eu aucun effet significatif sur les concentrations des quatre mycotoxines évaluées (DON, T2, ZEN et FUM), alors que d'autres facteurs (année, site et hybride) les ont souvent affectées (tableau 23). Ces résultats appuient l'étude réalisée par Blandino et coll. (2012) en Italie qui n'a démontré aucun effet significatif de l'application des fongicides azoxystrobine + propiconazole sur le contenu en fumonisines (FB_1 et FB_2). Selon ces auteurs, l'application de fongicide foliaire n'avait aucun effet significatif sur la sévérité de la fusariose de l'épi et du grain ainsi que sur l'accumulation en FUM. Les résultats d'une autre étude menée au Canada montrent une augmentation de 50 % et de 15 % de DON lorsque les fongicides Headline (pyraclostrobine) et Quilt (azoxystrobine + propiconazole) ont été appliqués respectivement sur le maïs-grain (Limay-Rios et Schaafsma, 2010), ce qui est en contradiction avec nos résultats.

On constate que les concentrations en DON ont été considérablement influencées par l'année (les conditions météorologiques), le site et les hybrides (tableau 23). Parmi les trois années, l'année 2011 affichait les conditions les plus favorables à la fusariose pendant les mois critiques de juillet et août. L'année 2010 a également montré des valeurs en DON plus élevées que celles de l'année 2009. Quant à l'effet site sur le DON, on constate que l'Assomption a eu des précipitations plus fortes que celles de Saint-Mathieu-de-Beloeil particulièrement en juillet et août 2011 (annexe A), ce qui pourrait expliquer que le DON ait été plus élevé à L'Assomption. De plus, les concentrations en DON étaient significativement différentes entre les hybrides. Parmi les 24 hybrides évalués, sept hybrides (2, 6, 9, 10, 16, 20, 22) avaient des concentrations moyennes de DON au-dessus de 1 ppm au cours des trois ans. En revanche, les hybrides 1, 7, 11, 13, 14 et 21 ont montré de faibles valeurs en DON et peuvent être désignés comme étant les hybrides les plus résistants à l'accumulation en DON. Les interactions Année \times Hybride ($F = 2,42$) et Année \times Site \times Hybride ($F = 1,99$) étaient significatives mais elles étaient peu importantes par rapport aux effets de l'année ($F = 40,88$), du site ($F = 7,6$) et de l'hybride ($F = 7,85$) et ne sont donc pas présentées.

Pour la toxine T2, l'année a eu un effet significatif sur l'accumulation de cette toxine (tableau 23). L'année 2011 a été celle affichant l'accumulation la plus importante en T2. Les contenus en T2 observés en 2009 étaient un peu plus élevés que ceux de l'année 2010, probablement en raison des températures plus fraîches et des fortes précipitations enregistrées en 2009. De plus, on observe que les concentrations en T2 étaient significativement différentes entre les hybrides. Parmi les 24 hybrides, les hybrides 4, 8 et 19 avaient les concentrations en T2 les plus élevées qui excédaient les 100 ppb. Cependant, aucun hybride n'a dépassé le seuil critique de 1000 ppb et l'incidence de T2 a donc été globalement faible quel que soit le traitement. L'interaction Année \times Site \times Fongicide \times Hybride était significative ($F = 1,48$) mais peu importante par rapport à l'effet de l'année ($F = 24,08$) et de l'hybride ($F = 2,35$) et n'est donc pas présentée.

La production de ZEN a principalement varié entre les hybrides ($F = 2,32$), mais aucun hybride n'a dépassé le seuil de 250 ppb. Parmi les 24 hybrides, l'hybride 6 avait la concentration la plus élevée en ZEN alors que les hybrides 13 et 24 étaient les hybrides les

plus résistants contre l'accumulation en ZEN. Bien que significative, l'interaction Année × Hybride ($F = 1,42$) était peu importante et n'est donc pas présentée.

Les concentrations en FUM ont été principalement influencées par l'année ($F = 34,03$), le site ($F = 7,53$) et l'interaction Année × Site ($F = 25,25$). À l'image du DON et de la T2, l'année 2011 a affiché les plus grandes concentrations en FUM, sans doute encore en raison des conditions météorologiques particulièrement favorables à la fusariose. L'analyse de l'interaction Année × Site (données non présentées) indique que l'accumulation en FUM à Saint-Mathieu-de-Beloeil en 2011 (1,30 ppm) s'est significativement différenciée des autres sites-années (0,15 ppm en moyenne). De plus, les concentrations en FUM étaient différentes entre les hybrides mais les concentrations moyennes des trois années étaient toutes inférieures au seuil critique de 1 ppm. Parmi les 24 hybrides, les hybrides 3 et 8 avaient les concentrations les plus élevées en FUM, tandis que les hybrides 4, 20 et 21 étaient les hybrides comportant le moins de cette toxine. Bien que significative, l'interaction Année × Site × Hybride ($F = 1,7$) était peu importante et n'est donc pas présentée.

Les résultats de ce chapitre sont en accord avec les résultats du chapitre 4. Les effets année, site et hybride étaient en effet significativement importants sur la toxine DON alors que les concentrations des autres toxines (T2, ZEN et FUM) étaient relativement faibles.

Tableau 23. Concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN, FUM) des hybrides de maïs-grain testés en 2009, 2010 et 2011 aux sites de L'Assomption et de Saint-Mathieu-de-Beloeil avec ou sans application de fongicide

Effets		DON (ppm)	T2 (ppb)	ZEN (ppb)	FUM (ppm)
Année	2009	0,30 c	24,3 b	26,5	0,10 b
	2010	0,67 b	15,0 c	44,3	0,10 b
	2011	1,31 a	137,6 a	76,3	0,83 a
Site	L'Assomption	0,93	36,9	60,8	0,20
	Saint-Mathieu-de-Beloeil	0,59	81,0	37,2	0,48
Fongicide	Avec fongicide	0,83	48,0	47,7	0,35
	Sans fongicide	0,69	70,0	50,4	0,34
Hybride	1 ^a	0,36	13,9	55,1	0,28
	2	1,04	48,9	70,5	0,49
	3	0,60	80,5	29,8	0,79
	4	0,70	135,4	49,2	0,06
	5	0,60	20,0	45,5	0,33
	6	1,26	25,2	109,3	0,21
	7	0,37	79,4	33,4	0,20
	8	0,53	181,7	71,4	0,90
	9	1,03	63,7	34,2	0,69
	10	1,10	55,1	58,2	0,22
	11	0,37	18,8	25,5	0,12
	12	0,77	51,0	16,0	0,47
	13	0,37	66,9	9,5	0,10
	14	0,27	19,2	20,9	0,22
	15	0,59	32,1	18,8	0,61
	16	1,56	75,4	69,1	0,24
	17	0,69	69,5	71,7	0,35
	18	0,93	28,5	87,2	0,22
	19	0,80	116,6	42,1	0,39
	20	1,43	46,5	54,4	0,07
	21	0,41	7,7	54,4	0,05
	22	1,03	75,7	84,2	0,17
	23	0,79	59,6	53,2	0,36
	24	0,63	44,1	13,3	0,67
Valeurs de P					
Année		0,000	0,001	ns	0,001
Site		0,033	ns	ns	0,034
Année*Site		ns	ns	ns	0,001
Fongicide		ns	ns	ns	ns
Année*Fongicide		ns	ns	ns	ns
Site*Fongicide		ns	ns	ns	ns
Année*Site*Fongicide		ns	ns	ns	ns
Hybride		<0,001	0,001	0,001	0,009
Année*Hybride		<0,001	ns	0,048	0,051
Site*Hybride		ns	ns	ns	ns
Année*Site*Hybride		0,000	ns	ns	0,005
Fongicide*Hybride		ns	ns	ns	ns
Année*Fongicide*Hybride		ns	ns	ns	ns
Site*Fongicide*Hybride		ns	ns	ns	ns
Année*Site*Fongicide*Hybride		ns	0,031	ns	ns

^aChaque numéro correspond à un hybride différent.

^bns = non significatif au seuil de $P > 0,05$.

5.4 Conclusions

Selon les résultats obtenus, l'application du fongicide foliaire Headline (pyraclostrobine) n'a pas eu d'influence significative sur les concentrations des quatre mycotoxines évaluées (DON, T2, ZEN et FUM). L'application de ce fongicide ne constitue pas une stratégie de gestion pour réduire la croissance des champignons et la production de l'une des quatre mycotoxines analysées dans le maïs-grain. Il est plutôt utilisé pour réduire l'incidence des maladies foliaires. Cependant, les résultats de ce chapitre confirment les résultats du chapitre précédent, c'est-à-dire que les facteurs année, site et hybride ont un effet significatif sur l'accumulation de DON et que les concentrations des autres toxines (T2, ZEN et FUM) demeurent faibles peu importe les traitements.

6. Discussion générale et conclusion

Ce projet de maîtrise avait pour objectif général d'évaluer la concentration en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) de différents hybrides de maïs-grain cultivés sous différentes conditions climatiques du Québec. Cette dernière section du mémoire vise à faire le point sur les différents résultats obtenus et à tenter de les expliquer en discutant des facteurs environnementaux et agronomiques qui influencent le contenu des quatre mycotoxines évaluées dans le maïs-grain.

6.1 Concentration en mycotoxines selon les effets de l'hybride de maïs-grain et de la zone climatique

La première hypothèse de ce projet était que les concentrations en toxines désoxynivalénol (DON), T2, zéaralénone (ZEN) et fumonisine (FUM), mesurées dans les grains de maïs-grain varient selon les hybrides ensemencés et selon les zones climatiques de culture au Québec. La moyenne générale de DON pour toutes les zones évaluées de 2009 à 2011 était de 0,74 ppm. Globalement, la concentration moyenne en DON a varié à chaque année et était inférieure à 1 ppm sauf dans la zone 3 en 2011, où on a observé la plus haute concentration en DON.

En général, les résultats sur les concentrations en DON nous permettent de conclure que les facteurs hybrides, année, site et zone ont eu une influence sur l'accumulation de cette toxine. Les deux facteurs année et site ont eu un impact plus important par rapport à l'hybride. Les facteurs année et site réfèrent principalement aux conditions météorologiques et géographiques puisque d'autres variables (par exemple, les systèmes de travail du sol, le précédent cultural et etc.) étaient quasiment similaires entre les sites pour chaque année de l'étude. Notre analyse sur une variable commune aux deux années (2010 et 2011) et aux trois zones climatiques a également démontré l'effet année comme étant le facteur dominant sur les concentrations en DON par rapport à l'effet site. En 2011, le contenu élevé de DON semble démontrer que les conditions météorologiques de cette année-là étaient plus favorables pour la production de cette toxine que celles de 2010. En regardant les données météorologiques, on s'aperçoit que tous les sites en 2011, sauf Saint-Alexis, avaient une température près ou légèrement au-dessus de la normale (moyenne de 30 ans)

de juin jusqu'à la fin d'octobre alors que les précipitations étaient nettement au-dessus de la normale pendant les mois d'août et septembre. Chez le maïs, des précipitations fortes, au cours de la période critique de l'apparition des soies et de la maturation, soit en juillet et août, peuvent favoriser la production de *F. graminearum* dans l'est du Canada (Sutton et coll., 1980; Sutton, 1982; Miller et coll. 1995).

Tel que déjà expliqué, le facteur hybride a un effet significatif sur la concentration en DON, à peu près dans toutes les zones (1, 2 et 3) et pour toutes les années (2009, 2010, 2011), sauf dans la zone 1 en 2009 où la fusariose et la production de DON étaient presque inexistantes. L'importance de l'hybride sur le contenu en mycotoxines a été confirmée par plusieurs études (Vigier et coll., 2001; Munkvold, 2003a; de la Campa et al. 2005; Hooker et Schaafsma, 2005; Mesterházy et coll., 2012). En effet, le choix d'hybrides résistants à la fusariose de l'épi pourrait réduire significativement la présence de la maladie et la production de toxines chez le maïs-grain (Hooker et Schaafsma, 2005). Certains hybrides de notre étude ont montré une résistance plus constante, peu importe le site et peu importe l'année. Le nombre d'hybrides résistants année après année est assez limité, un constat aussi observé par Schaafsma et coll. (1997). Dans notre étude, nous avions 15 hybrides ayant un comportement stable parmi un total de 54 hybrides communs pour les deux années 2010 et 2011. Cependant, il ne faut pas oublier que si un hybride est résistant à une espèce particulière de fusariose et une toxine précise, cela ne signifie pas que cet hybride est résistant à toutes les espèces et toutes les toxines. Le même hybride peut être plus sensible à d'autres espèces et d'autres toxines dans la même région (Dorn et coll., 2011).

Les résultats des contrastes à priori, en regroupant les sites selon leurs zones et en comparant ces groupes, nous permettent de conclure que la zone climatique avait souvent un effet significatif sur la toxine DON. La zone 3 (2300 à 2500 UTM), avec un niveau élevé de DON, a été définie comme étant la zone la plus favorable pour la production de cette toxine en 2010 et 2011. Cela est probablement associé aux conditions plus fraîches et humides de la zone 3 par rapport aux deux autres zones. De plus, les hybrides de la zone 3 ont été semés plus tard que ceux des zones 1 (2700 à 2900 UTM) et 2 (2500 à 2700 UTM). Il est donc probable que pour les hybrides de la zone 3, la période critique de maturation a coïncidé avec des températures modérées, de fortes précipitations et des conditions humides

qui étaient plus favorables pour le développement des fusarioSES à *F. graminearum* et donc de la toxine DON.

De façon générale, les contenus en toxines T2, ZEN et FUM des différents hybrides de maïs-grain étaient peu élevés et ne dépassaient pas les recommandations de l'ACIA. La moyenne globale de T2 pour toutes les zones et pour les trois années à l'étude était de 34,7 ppb et 100 % des hybrides avaient donc des concentrations acceptables pour la production porcine (moins de 1000 ppb). Pour la toxine ZEN, la moyenne générale pour toutes les zones et pour les années 2009 à 2011 était de 34,5 ppb et de 95 à 100 % des hybrides évalués avaient des concentrations acceptables (moins de 250 ppb). Enfin, la moyenne générale de FUM pour toutes les zones évaluées et pour les années 2009 à 2011 était de 0,22 ppm et 100 % des hybrides avaient des concentrations acceptables (moins de 10 ppm).

En général, les résultats sur les concentrations en T2, ZEN et FUM nous permettent de conclure que les facteurs hybrides, année, site et zone avaient occasionnellement une influence significative sur l'accumulation de ces toxines mais que les variations entre les moyennes étaient généralement petites avec des effets souvent négligeables.

Par conséquent, notre hypothèse mentionnant que les concentrations en toxines désoxynivalénol (DON), T2, zéaralénone (ZEN), et fumonisine (FUM), mesurées dans les grains de maïs varient selon les hybrides ensemencés et selon les zones climatiques de culture au Québec, est confirmée.

6.2 Relation entre la maturité des hybrides de maïs-grain et les concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM)

La deuxième hypothèse de ce projet était qu'il existe une relation entre la maturité des hybrides de maïs-grain et les concentrations en mycotoxines (DON, T2, ZEN, FUM). Les résultats obtenus en 2009 ont démontré que la maturité n'a pas influencé significativement les concentrations de chacune des trois mycotoxines T2, ZEN et FUM des grains de maïs, peu importe le site. Le seul effet significatif a été constaté sur la toxine DON. Les hybrides hâtifs ont montré un niveau légèrement plus élevé de DON par rapport aux hybrides tardifs. Il est possible que puisque les hybrides hâtifs aient été récoltés simultanément aux hybrides tardifs, cela a pu favoriser l'augmentation en DON chez certains hybrides hâtifs.

De plus, les coefficients de régression entre la maturité physiologique et le contenu de chacune des quatre mycotoxines au cours des années 2009, 2010 et 2011, pour chacune des trois zones de production, étaient très faibles (tableau 21). Par conséquent, la relation entre la maturité des hybrides et les concentrations en mycotoxines posée dans notre deuxième hypothèse n'est pas confirmée.

6.3 Effet de l'application du fongicide foliaire Headline sur les concentrations en DON, T2, ZEN et FUM du maïs-grain

La troisième et la dernière hypothèse de ce projet était que l'application du fongicide foliaire Headline (Pyraclostrobine) sur le maïs n'a pas d'effets sur la concentration en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) des grains de maïs. Les résultats obtenus ont démontré que l'application du fongicide Headline n'a pas influencé significativement les contenus en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) des grains de maïs, peu importe le site et l'année, confirmant ainsi notre hypothèse. En effet, l'utilisation du fongicide Headline (pyraclostrobine) dans la production de maïs-grain semble être une stratégie insatisfaisante pour réduire la croissance des *Fusarium* (*F. graminearum*, *F. sporotrichioides* et *F. verticillioides*) et la production de chacune des quatre mycotoxines analysées.

Les résultats de ce projet ont démontré que les hybrides de maïs-grain ensemencés au Québec sont de bonne qualité et que leurs contenus en mycotoxines (DON, T2, ZEN et FUM) sont généralement sous les seuils des valeurs critiques acceptées par l'ACIA. Cependant, le DON est la toxine la plus répandue parmi les quatre toxines et peut varier selon les hybrides, les années et les zones climatiques. Certains hybrides de notre étude ont affiché une résistance plus stable, peu importe le site et peu importe l'année alors que la zone 3 (2300 à 2500 UTM) a été la plus propice au développement du DON. La contamination des hybrides de maïs-grain par les trois autres toxines (T2, ZEN, FUM) était mineure.

Bibliographie

- ACIA (Agence canadienne d'inspection des aliments). (2012). RG-8 Regulatory Guidance: Contaminants in Feed (formerly RG-1, Chapter 7). Section 1: Mycotoxins in Livestock Feed, In: Charmley, L.L., Trenholm, H.L. (Ed.), ACIA, Ottawa. Online publication available at <http://www.inspection.gc.ca/animals/feeds/regulatoryguidance/rg8/eng/1347383943203/1347384015909?chap=1>
- Alma, A., Lessio, F., Reyneri, A., Blandino, M. 2005. Relationships between *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) feeding activity, crop technique and mycotoxin contamination of corn kernel in northwestern Italy. International Journal of Pest Management. 51(3): 165-173.
- Archer, T.L., Patrick, C., Schuster, G., Cronholm, G., Bynum Jr, E.D., Morrison, W.P. 2001. Ear and shank damage by corn borers and corn earworms to four events of *Bacillus thuriengiensis* transgenic maize. Crop Protection. 20(2): 139-144.
- Ariño, A., Herrera, M., Juan, T., Estopañan, G., Carramiñana, J.J., Rota, C., Herrera, A. 2009. Influence of agricultural practices on the contamination of maize by fumonisin mycotoxins. Journal of Food Protection. 72(4): 898-902.
- Bailey, K.L., Couture, L., Gossen, B.D., Gugel, R.K., Morrall, R.A.A. 2004. Maladies des grandes cultures au Canada. Société canadienne de phytopathologie. 318 p.
- Baird, R.E., Mullinix, B.G., Peery, A.B., Lang, M.L. 1997. Diversity and longevity of the soybean debris mycobiota in a no-tillage system. Plant Disease. 81(5): 530-534.
- Bakan, B., Melcion, D., Richard-Molard, D., Cahagnier, B. 2002. Fungal growth and *Fusarium* mycotoxin content in isogenic traditional maize and genetically modified maize grown in France and Spain. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 50(4): 728-731.
- Baldwin, R.S., Williams, R.D., Terry, M.K. 1983. Zeranol: a review of the metabolism, toxicology and analytical methods for detection of tissue residues. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 3(1): 9-25.
- Bartelt, R.J., Wicklow, D.T. 1999. Volatiles from *Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg and their attractiveness to Nitidulid beetles. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 47(6): 2447-2454.
- Beardall, G.M., Miller, J.D., Trenholm, H.L. 1994. Diseases in humans with mycotoxins as possible causes. In: Miller, J.D., Trenholm, H.L. (eds). Mycotoxins in Grain: Compounds Other Than Aflatoxin. 487-539. Eagan press, St. Paul, Minnesota, USA.
- Bennett, J.W., Klich, M. 2003. Mycotoxins. Clinical Microbiology Reviews. 16: 497-516.

Beyer, M., Klix, M.B., Klink, H., Verreet, J.A. 2006. Quantifying the effects of previous crop, tillage, cultivar and triazole fungicides on the deoxynivalenol content of wheat grain – a review. *Journal of Plant Diseases and Protection* 113: 241-246.

Bezuidenhout, S.C., Gelderblom, W.C.A., Gorst-Allman, C.P., Horak, R.M., Marasas, W.F.O., Spiteller, G., Vleggaar, R. 1988. Structure elucidation of the fumonisin mycotoxins from *Fusarium moniliforme*. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*. 11: 743-745.

Bhatnagar, D., Brown, R., Ehrlich, K., Cleveland, T.E. 2002. Mycotoxins contaminating cereal grain crops: their occurrence and toxicity. *Applied Mycology and Biotechnology*. 2: 171-196.

Blandino, M., Reyneri, A. 2010. Effect of maize hybrid maturity and grain hardness on fumonisin and zearalenone contamination. *Italian Journal of Agronomy*. 3(2): 107-117.

Blandino, M., Galeazzi, M., Savoia, W., Reyneri, A. 2012. Timing of azoxystrobin+ propiconazole application on maize to control northern corn leaf blight and maximize grain yield. *Field Crops Research*. 139: 20-29.

Bourdages, J.V., Marchand, S., Belzile, F.J., Rioux, S. 2006. Diversity and prevalence of *Fusarium* species from Quebec barley fields. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 28(3): 419-425.

Bottalico, A., Perrone, G. 2002. Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with head blight in small-grain cereals in Europe. *European Journal of Plant Pathology*. 108(7): 611-624.

Bryden, W.L. 2007. Mycotoxins in the food chain: human health implications. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*. 16(Suppl.1): 95-101.

Bryden, W.L. 2012. Mycotoxin contamination of the feed supply chain: Implications for animal productivity and feed security. *Animal Feed Science and Technology*. 173(1): 134-158.

Campbell, H., Choo, T.M., Vigier, B., Underhill, L. 2002. Comparison of mycotoxin profiles among cereal samples from eastern Canada. *Canadian Journal of Botany*. 80(5): 526-532.

Cardwell, K.F., Kling, J.G., Maziya-Dixon, B., Bosque-Perez, N.A. 2000. Interactions between *Fusarium verticillioides*, *Aspergillus flavus*, and insect infestation in four maize genotypes in lowland Africa. *Phytopathology*. 90(3): 276-284.

Champeil, A., Doré, T., Fourbet, J. 2004. *Fusarium* head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by *Fusarium* in wheat grains. *Plant Science*. 166(6): 1389-1415.

Cole, R.J., Cox, R.H. 1981. *Handbook of toxic fungal metabolites*. Academic Press, New York, 937 p.

Cotton, T.K., Munkvold, G.P. 1998. Survival of *Fusarium moniliforme*, *F. proliferatum*, and *F. subglutinans* in maize stalk residue. *Phytopathology*. 88(6): 550-555.

De la Campa, R., Hooker, D.C., Miller, J.D., Schaafsma A.W, Hammond BG. 2005. Modeling effects of environment, insect damage, and Bt genotypes on fumonisin accumulation in maize in Argentina and the Philippines. *Mycopathologia*. 159(4): 539-552.

Del Ponte, E.M., Shah, D.A., Bergstrom, G.C. 2003. Spatial patterns of Fusarium head blight in New York wheat fields suggest role of airborne inoculum. *On Line. Plant Health Progress*. (DOI: 10.1094/PHP-2003-0418-01-RS.)

De Luna, L., Paulitz, T.C., Bujold, I., Carisse, O. 2002. Ascospore gradients of *Gibberella zaeae* from overwintered inoculum in wheat fields. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 24(4): 457-464.

Desjardins, A.E., Munkvold, G.P., Plattner, R.D., Proctor, R.H. 2002. FUM1-a gene required for fumonisin biosynthesis but not for maize ear rot and ear infection by *Gibberella moniliformis* in field tests. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 15(11): 1157-1164.

Desjardins, A.E. 2006. *Fusarium mycotoxins: chemistry, genetics, and biology*. American Phytopathological Society Press. St.Paul, MN, 260 p.

Dill-Macky, R., Jones, R.K. 2000. The effect of previous crop residues and tillage on Fusarium head blight of wheat. *Plant Disease*. 84(1): 71-76.

D'Mello, J.P.F., Porter, J.K., Macdonald, A.M.C., Placinta, C.M. 1997. *Fusarium mycotoxins*. In: D'Mello, J.P.F. (Ed.), *Handbook of Plant and Fungal Toxicants*. CRC Press. Boca Raton, FL, p. 287-301.

Doohan, F.M., Brennan, J., Cooke, B.M. 2003. Influence of climatic factors on Fusarium species pathogenic to cereals. *European Journal of Plant Pathology*. 109(7): 755-768.

Dorn, B., Forrer, H.R., Jenny, E., Wettstein, F.E., Bucheli, T.D., Vogelsgang, S. 2011. *Fusarium* species complex and mycotoxins in grain maize from maize hybrid trials and from grower's fields. *Journal of Applied Microbiology*. 111(3): 693-706.

Dowd, P.F. 1998. Involvement of arthropods in the establishment of mycotoxicogenic fungi under field conditions. In: Sinha K.K., Bhatnagar, D. (Ed.), *Mycotoxins in Agriculture and Food Safety*. Marcel Dekker, Inc. NY, USA, p. 307-350.

Dowd, P.F. 2001. Biotic and abiotic factors limiting efficacy of Bt corn in indirectly reducing mycotoxin levels in commercial fields. *Journal of Economic Entomology*. 94(5): 1067-1074.

Draughon, F.A., Churchville, D.C. 1985. Effect of pesticides on zearalenone production in culture and in corn plants. *Phytopathology*. 75(5): 553-556.

Fernandez, M.R., Zentner, R.P., DePauw, R.M., Gehl, D., Stevenson, F.C. 2007. Impacts of crop production factors on Fusarium head blight in barley in eastern Saskatchewan. *Crop Science*. 47: 1574-1584.

Fernando, W.G.D., Paulitz, T.C., Seaman, W.L., Dutilleul, P., Miller, J.D. 1997. Head blight gradients caused by *Gibberella zae* from area sources of inoculum in wheat field plots. *Phytopathology*. 87(4): 414-421.

Fernando, W.G., Miller, J.D., Seaman, W.L., Seifert, K., Paulitz, T.C. 2000. Daily and seasonal dynamics of airborne spores of *Fusarium graminearum* and other *Fusarium* species sampled over wheat plots. *Canadian Journal of Botany*. 78(4): 497-505.

Flannigan, B. 1991. Mycotoxins. In: D'Mello, J.P.F., Duffus, C.M., Duffus, J.H. (Eds.), *Toxic Substances in Crop Plants*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, p. 226-257.

Franci, L., Shaner, G., Bergstrom, G., Gilbert, J., Pedersen, W., Dill-Macky, R., Sweets, L., Corwin, B., Jin, Y., Gallenberg, D., Wiersma, J. 1999. Daily inoculum levels of *Gibberella zae* on wheat spikes. *Plant Disease*. 83(7): 662-666.

Gilbert, J., Tekauz, A. 2000. Review: Recent developments in research on Fusarium head blight of wheat in Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 22(1): 1-8.

Gilbert, J., Fernando, W. 2004. Epidemiology and biological control of *Gibberella zae*/*Fusarium graminearum*. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 472: 464-472.

Gilbertson, R.L., Brown, W.M. Jr, Ruppel, E.G., Capinera, J.L. 1986. Association of corn stalk rot *Fusarium spp.* and Western corn rootworm beetles in Colorado. *Phytopathology*. 76(12): 1309-1314.

Haidukowski, M., Pascale, M., Perrone, G., Pancaldi, D., Campagna, C., Visconti, A. 2005. Effect of fungicides on the development of Fusarium head blight, yield and deoxynivalenol accumulation in wheat inoculated under field conditions with *Fusarium graminearum* and *Fusarium culmorum*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 85(2): 191-198.

Haidukowski, M., Visconti, A., Perrone, G., Vanadia, S., Pancaldi, D., Covarelli, L., Pascale, M., Balestrazzi, R. 2012. Effect of prothioconazole-based fungicides on Fusarium head blight, grain yield and deoxynivalenol accumulation in wheat under field conditions. *Phytopathologia Mediterranea*. 51(1): 236-246.

Hasan, H.A.H. 1993. Fungicide inhibition of aflatoxins, diacetoxyscirpenol and zearalenone production. *Folia Microbiologica*. 38(4): 295-298.

Hooker, D.C., Schaafsma, A.W. 2005. Agronomic and environmental impacts on concentrations of deoxynivalenol and fumonisin B1 in corn across Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 27(3): 347-356.

Hooker, D., Tenuta, A., Stewart, G. 2009. Impact of Foliar Fungicides on Corn Hybrids. Crop Advances: Field Crop Reports. Online publication available at <http://www.ontariosoilcrop.org/docs/v6cor4.pdf>

Hörberg, H.M. 2002. Patterns of splash dispersed conidia of *Fusarium poae* and *Fusarium culmorum*. European Journal of Plant Pathology. 108(1): 73-80.

Inch, S.A., Gilbert, J. 2003. Survival of *Gibberella zae* in Fusarium-damaged wheat kernels. Plant Disease. 87(3): 282-287.

Inch, S., Fernando, W.G.D., Gilbert, J. 2005. Seasonal and daily variation in the airborne concentration of *Gibberella zae* (Schw.) Petch spores in Manitoba. Canadian Journal of Plant Pathology. 27(3): 357-363.

Jenkinson, P., Parry, D.W. 1994. Splash dispersal of conidia of *Fusarium culmorum* and *Fusarium avenaceum*. Mycological Research. 98(5): 506-510.

Jouany, J.P. 2007. Methods for preventing, decontaminating and minimizing the toxicity of mycotoxins in feeds. Animal Feed Science and Technology. 137(3): 342-362.

Khonga, E.B., Sutton, J.C. 1988. Inoculum production and survival of *Gibberella zae* in maize and wheat residues. Canadian Journal of Plant Pathology. 10(3): 232-239.

Koch, H.J., Pringas, C., Maerlaender, B. 2006. Evaluation of environmental and management effects on Fusarium head blight infection and deoxynivalenol concentration in the grain of winter wheat. European Journal of Agronomy. 24(4): 357-366.

Kumar, V., Basu, M.S., Rajendran, T.P. 2008. Mycotoxin research and mycoflora in some commercially important agricultural commodities. Crop Protection. 27(6): 891-905.

Lauren, D.R., Smith, W.A., Di Menna, M.E. 2007. Influence of harvest date and hybrid on the mycotoxin content of maize (*Zea mays*) grain grown in New Zealand. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science. 35(3): 331-340.

Leonard, K.J., Bushnell, W.R. (Ed.) 2003. Fusarium head blight of wheat and barley. American Phytopathological Society Press. St.Paul, MN, 512 p.

Limay-Rios, V., Schaafsma, A.W. 2010. Development of an Integrated Mycotoxin Management System in Ontario Grains. Development of a Mycotoxin Management System. Ridgetown, Ontario. Online publication available at http://www.ontariopork.on.ca/Portals/0/Docs/Research/reports/Interin_Report2ADV06392009.pdf

Logrieco, A., Mule, G., Moretti, A., Bottalico, A. 2002. Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with maize ear rot in Europe. European Journal of Plant Pathology. 108(7): 597-609.

Logrieco, A., Bottalico, A., Mulé, G., Moretti, A., Perrone, G. 2003. Epidemiology of toxigenic fungi and their associated mycotoxins for some Mediterranean crops. European Journal of Plant Pathology. 109(7): 645-667.

Ma, B.L., Dwyer, L.M. 2001. Maize kernel moisture, carbon and nitrogen concentrations from silking to physiological maturity. Canadian Journal of Plant Science. 81(2): 225-232.

(MAAARO) Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. (2009). Guide agronomique des grandes cultures. Publication 811F. Toronto, ON.

Madden, L.V., Paul, P.A. 2009. Assessing heterogeneity in the relationship between wheat yields and Fusarium head blight intensity using random-coefficient mixed models. Phytopathology. 99(7): 850-860.

Magan, N., Hope, R., Colleate, A., Baxter, E.S. 2002. Relationship between growth and mycotoxin production by *Fusarium* species, biocides and environment. European Journal of Plant Pathology. 108(7): 685-690.

Magg, T., Melchinger, A.E., Klein, D., Bohn, M. 2002. Relationship between European corn borer resistance and concentration of mycotoxins produced by *Fusarium spp.* in grains of transgenic Bt maize hybrids, their isogenic counterparts, and commercial varieties. Plant Breeding. 121(2): 146-154.

Maldonado-Ramirez, S.L., Schmale III, D.G., Shields, E.J., Bergstrom, G.C. 2005. The relative abundance of viable spores of *Gibberella zaeae* in the planetary boundary layer suggests the role of long-distance transport in regional epidemics of fusarium head blight. Agricultural and Forest Meteorology. 132(1): 20-27.

Mansfield, M.A., De Wolf, E.D., Kuldau, G.A. 2005. Relationships between weather conditions, agronomic practices, and fermentation characteristics with deoxynivalenol content in fresh and ensiled maize. Plant Disease. 89(11): 1151-1157.

Markell, S.G., Franci, L.J. 2003. Fusarium head blight inoculum: species prevalence and *Gibberella* spore types. Plant Disease. 87(7): 814-820.

Mazzoni, E., Scandolara, A., Giorni, P., Pietri, A., Battilani, P. 2011. Field control of Fusarium ear rot, *Ostrinia nubilalis* (Hübner), and fumonisins in maize kernels. Pest Management Science. 67(4): 458-465.

McMullen, M., Jones, R., Gallenberg, D. 1997. Scab of wheat and barley: a re-emerging disease of devastating impact. Plant Disease. 81(12): 1340-1348.

Merrill Jr., A.H., Sullards, M.C., Wang, E., Voss, K.A., Riley, R.T. 2001. Sphingolipid metabolism: roles in signal transduction and disruption by fumonisins. Environmental Health Perspectives. 109(Suppl.2): 283-289.

Mesterházy, Á., Bartok, T. 1996. Control of Fusarium head blight of wheat by fungicides and its effect on the toxin contamination of the grains. *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer* (English Ed.). 49(2): 181-198.

Mesterházy, Á., Lemmens, M., Reid, L.M. 2012. Breeding for resistance to ear rots caused by *Fusarium* spp. in maize—a review. *Plant Breeding*. 131(1): 1-19.

Miller, J.D. 1994. Epidemiology of *Fusarium* ear diseases of cereals. *Dans Mycotoxins in grain: Compounds other than aflatoxin*. In: Miller, J.D., Trenholm, H.L. St.Paul, MN, Eagan Press. p. 19-36.

Miller, J.D. 1995. Fungi and mycotoxins in grain: Implications for stored product research. *Journal of Stored Products Research*. 31(1): 1-16.

Miller, J.D., Savard, M.E., Schaafsma, A.W., Seifert, K.A., Reid, L.M. 1995. Mycotoxin production by *Fusarium moniliforme* and *Fusarium proliferatum* from Ontario and occurrence of fumonisin in the 1993 corn crop. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 17: 233-239.

Miller, J.D. 1998. Global significance of mycotoxins. *Sous la direction de*: Miraglia, M., van Egmond, H., Brera, C., Gilbert, J. (Eds.), *Mycotoxins and Phycotoxins Developments in Chemistry, Toxicology and Food Safety*. Alaken Inc, Ford Collins, CO. 3-15.

Miller, J.D., Culley, J., Fraser, K., Hubbard, S., Meloche, F., Ouellet, T., Seaman, W.L., Seifert, K.A., Turkington, K., Voldeng, H. 1998. Effect of tillage practice on *Fusarium* head blight of wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 20(1): 95-103.

Miller, J.D., ApSimon, J.W., Blackwell, B.A., Greenhalgh, R., Taylor, A. 2001. Deoxynivalenol: a 25 year perspective on a trichothecene of agricultural importance. *Sous la direction de*: Summerell, B.A., Leslie, J.F., Backhouse, D., Bryden, W.L., Burgess, L.W. (Ed.), *Fusarium*, Paul E. Nelson Memorial Symposium. APS Press. St. Paul, MN. 310-319.

Miller, S.S., Reid, L.M., Harris, L.J. 2007. Colonization of maize silks by *Fusarium graminearum*, the causative organism of Gibberella ear rot. *Canadian Journal of Botany*. 85(4): 369-376.

Miller, J.D. 2008. Mycotoxins in small grains and maize: old problems, new challenges. *Food Additives and Contaminants*. 25(2): 219-230.

Milus, E.A., Weight, C.T. (1998, October). Efficacy of Quadris and Benlate applications on wheat scab in Arkansas. In *Proceedings of National Fusarium Head Blight Forum*, 51-52.

Mirocha, C.J. 1984. Mycotoxicoses associated with *Fusarium*. In *The Applied Mycology of Fusarizan* (Edited by Moss M.O. and Smith J. E.). Cambridge University Press, U.K. 141-155.

Moss, M.O., Frank, J.M. 1985. Influence of the fungicide tridemorph on T-2 toxin production by *Fusarium sporotrichioides*. Transactions of the British Mycological Society. 84(4): 585-590.

Munkvold, G.P., Carlton, W.M. 1997. Influence of inoculation method on systemic *Fusarium moniliforme* infection of maize plants grown from infected seeds. Plant Disease. 81: 211-216

Munkvold, G.P., Desjardins, A.E. 1997. Fumonisins in maize. Can we reduce their Occurrence? Plant Disease. 81(6): 556-565.

Munkvold, G.P., Hellmich, R.L., Showers, W.B. 1997. Reduced Fusarium ear rot and symptomless infection in kernels of maize genetically engineered for European corn borer resistance. Phytopathology. 87(10): 1071-1077.

Munkvold, G.P. 2003a. Cultural and genetic approaches to managing mycotoxins in maize. Annual Review of Phytopathology. 41(10): 99-116.

Munkvold, G. 2003b. Epidemiology of Fusarium diseases and their mycotoxins in maize ears. European Journal of Plant Pathology. 109(7): 705-713.

Munkvold, G.P., Doerge, T., Bradley, C. 2008. IPM is still alive for corn leaf disease: look before you spray. In: Proc. 62nd Annu. Corn Sorghum Res. Conf. Chicago, American Seed Trade Association, Alexandria, VA.

Normales et moyennes climatiques canadiennes - Environnement Canada. 2013. Normales climatiques canadiennes. Disponible à http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_e.html, et la moyenne mensuelle pour chaque station d'année 2009, 2010, 2011. Disponible à http://climate.weather.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData_e.html

Nyvall, R.F., Kommedahl, T. 1968. Individual thickened hyphae as survival structures of *Fusarium moniliforme* in corn. Phytopathology. 58: 1704-1707.

Obst, A., Lepschy-von Gleissenthall, J., Beck, R. 1997. On the aetiology of Fusarium head blight of wheat in South Germany – preceding crops, weather conditions for inoculum production and head infection, proneness of the crop to infection and mycotoxin production. Cereal Research Communications. 25: 699-703.

Ooka, J.J., Kommedahl, T. 1977. Wind and rain dispersal of *Fusarium moniliforme* in corn fields. Phytopathology. 67(8): 1023-1026.

Osborne, L.E., Stein, J. M. 2007. Epidemiology of Fusarium head blight on small-grain cereals. International Journal of Food Microbiology. 119(1-2): 103-8.

- Papst, C., Utz, H.F., Melchinger, A.E., Eder, J., Magg, T., Klein, D., Bohn, M. 2005. Mycotoxins Produced by *Fusarium* spp. in Isogenic Bt vs. non-Bt Maize Hybrids under European Corn Borer Pressure. *Agronomy Journal*. 97(1): 219-224.
- Parry, D.W., Jenkinson, P., McLeod, L. 1995. Fusarium ear blight (scab) in small grain cereals-a review. *Plant Pathology*. 44(2): 207-238.
- Parsons, M.W., Munkvold, G.P. 2010. Associations of planting date, drought stress, and insects with Fusarium ear rot and fumonisin B1 contamination in California maize. *Food Additives and Contaminants*. 27(5): 591-607.
- Paul, P.A., Lipps, P.E., Hershman, D.E., McMullen, M.P., Draper, M.A., Madden, L.V. 2008. Efficacy of triazole-based fungicides for Fusarium head blight and deoxynivalenol control in wheat: A multivariate meta-analysis. *Phytopathology*. 98(9): 999-1011.
- Paul, P.A., Madden, L.V., Bradley, C.A., Robertson, A.E., Munkvold, G.P., Shaner, G., Wise, K.A., Malvich, D.K., Allen, T.W., Grybauskas, A., Vincelli, P., Esker, P. 2011. Meta-analysis of yield response of hybrid field corn to foliar fungicides in the U.S. Corn Belt. *Phytopathology*. 101: 1122-1132.
- Paulitz, T.C. 1996. Diurnal release of ascospores by *Gibberella zaeae* in inoculated wheat plots. *Plant Disease*. 80(6): 674-678.
- Pereyra, S.A., Dill-Macky, R., Sims, A.L. 2004. Survival and inoculum production of *Gibberella zaeae* in wheat residue. *Plant Disease*. 88(7): 724-730.
- Pirgozliev, S.R., Edwards, S.G., Hare, M.C., Jenkinson, P. 2002. Effect of dose rate of azoxystrobin and metconazole on the development of Fusarium head blight and the accumulation of deoxynivalenol (DON) in wheat grain. *European Journal of Plant Pathology*. 108(5): 469-478.
- Pirgozliev, S.R., Edwards, S.G., Hare, M.C., Jenkinson, P. 2003. Strategies for the control of Fusarium head blight in cereals. *European Journal of Plant Pathology*. 109(7): 731-742.
- Placinta, C., D'Mello, J.P., Macdonald, A.M. 1999. A review of worldwide contamination of cereal grains and animal feed with Fusarium mycotoxins. *Animal Feed Science and Technology*. 78(1): 21-37.
- Prelusky, D.B., Rotter, B.A., Rotter, R.G. 1994. Toxicology of mycotoxins. In Miller, J.D., Trenholm, H.L. *Mycotoxins in grain: compounds other than aflatoxin*. Eagan Press, St.Paul MN. p. 359-403.
- Reid, L. M., Stewart, D.W., Hamilton, R.I. 1996. A 4-year study of the association between *Gibberella* ear rot severity and deoxynivalenol concentration. *Journal of Phytopathology*. 144(9-10): 431-436.

Reid, L.M., Hamilton, R.I. 1996. Screening maize for resistance to Gibberella ear rot. Agriculture and Agri-Food Canada Technical Bulletin 1996-5E.

Reid, L.M., Sinha, R.C. 1998. Maize maturity and the development of Gibberella ear rot symptoms and deoxynivalenol after inoculation. European Journal of Plant Pathology. 104(2): 147-154.

Reid, L.M., Nicol, R.W., Ouellet, T., Savard, M., Miller, J.D., Young, J.C., Stewart, D.W., Schaafsma, A.W. 1999. Interaction of *Fusarium graminearum* and *F. moniliforme* in maize ears: disease progress, fungal biomass, and mycotoxin accumulation. Phytopathology. 89(11): 1028-1037.

Résultats 2009 et recommandations 2010 des RGCQ (Réseaux Grandes Cultures du Québec cultivars de plantes). Centre de recherche sur les grains inc. (CÉROM). Disponible à http://www.cerom.qc.ca/documentation/Resultats_RGCQ_2009.pdf

Résultats 2010 et recommandations 2011 des RGCQ (Réseaux Grandes Cultures du Québec cultivars de plantes). Centre de recherche sur les grains inc. (CÉROM). Disponible à <http://www.cerom.qc.ca/Documentation/RGCQ2010-2011.pdf>

Résultats 2011 et recommandations 2012 des RGCQ (Réseaux Grandes Cultures du Québec cultivars de plantes). Centre de recherche sur les grains inc. (CÉROM). Disponible à http://www.cerom.qc.ca/documentation/Resultats_RGCQ_2011.pdf

Rioux, S., Pageau, D., Lajeunesse, J., Lafond, J., Savard, M.E. 2005. Previous crop residues and fusarium head blight on cereals. Proceeding 4th Canadian Workshop on Fusarium Head Blight, Ottawa, November. 1-3: 83-88.

Rioux, S., Fortin, S. 2008. Influence du mode et du temps de récolte sur le développement de la vomitoxine (DON) chez l'orge. Journée d'information des grandes cultures. CRAAQ. 2008.[Online].http://www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/Collmai08_resumes_conf.pdf

Rossi, V., Languasco, L., Pattori, E., Giosuè, S. 2002. Dynamics of airborne *Fusarium* macroconidia in wheat fields naturally affected by head blight. Journal of Plant Pathology. 84(1): 53-64.

Rotter, B.A. 1996. Invited review: Toxicology of deoxynivalenol (vomitoxin). Journal of Toxicology and Environmental Health Part A. 48(1): 1-34.

SAS Institute, Inc. 1987. SAS/STAT guide for personal computer. Version 6 ed. SAS Institute Inc., Cary, NC.

SAS Institute. 2003. Inc., SAS/STAT user's guide. V.9.1.3 SAS Inst., Cary, NC.

SAgE pesticides. 2013. Traitements phytosanitaires et risques associés. <http://sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheTraitements.aspx>

Savard, M., Durivage, G. 2009. L'analyse des mycotoxines, plus facile à demander qu'à faire. Conférence Journée d'information sur les mycotoxines. Disponible à <http://www.symposium-mycotoxines.ca/sites/default/files/imce/documents/myco-savard.pdf>

Schaafsma, A.W., Nicol, R.W., Reid, L.M. 1997. Evaluating commercial maize hybrids for resistance to Gibberella ear rot. European Journal of Plant Pathology. 103(8): 737-746.

Schaafsma, A.W., Ilinic, L.T., Miller, J.D., Hooker, D.C. 2001. Agronomic considerations for reducing deoxynivalenol in wheat grain. Canadian Journal of Plant Pathology. 23(3): 279-285.

Schaafsma, A.W., Hooker, D.C., Baute, T.S., Illincic-Tamburic, L. 2002. Effect of Bt-corn hybrids on deoxynivalenol content in grain at harvest. Plant Disease. 86(10): 1123-1126.

Schaafsma, A.W., Savard, M.E., Clear, R., Dexter, J. 2004. Methods and issues regarding detection of deoxynivalenol, Fusarium-damaged kernels, and *Fusarium spp.* in commercial grain in Canada. Canadian Journal of Plant Pathology. 26(4): 443-452.

Schaafsma, A.W., Tamburic-Illincic, L., Hooker, D.C. 2005. Effect of previous crop, tillage, field size, adjacent crop, and sampling direction on airborne propagules of *Gibberella zae/Fusarium graminearum*, Fusarium head blight severity, and deoxynivalenol accumulation in winter wheat. Canadian Journal of Plant Pathology. 27: 217-224.

Schaafsma, A.W., Tamburic-Illincic, L., Reid, L.M. 2006. Fumonisin B1 accumulation and severity of Fusarium ear rot and Gibberella ear rot in food-grade corn hybrids in Ontario after inoculation according to two methods. Canadian Journal of Plant Pathology, 28(4): 548-557.

Schaafsma, A.W., Limay-Rios, V. 2008. Learning from 2006 to reduce impacts of *Fusarium* epidemics to stakeholders of the corn industry. Ontario. 28th Annual Centralia Swine Research Update.

Schmale III, D.G., Bergstrom, G.C., Shields, E.J. 2006. Night-time spore deposition of the Fusarium head blight pathogen, *Gibberella zae*, in rotational wheat fields. Canadian Journal of Plant Pathology. 28(1): 100-108.

Schulthess, F., Cardwell, K.F., Gounou, S. 2002. The effects of endophytic *Fusarium verticillioides* on infestation of two maize varieties by lepidopterous stemborers and coleopteran grain feeders. Phytopathology. 92(2): 120-128.

Scott, P.M. 1989. The natural occurrence of trichothecenes. *Sous la direction de:* Beasley, V.H. (Ed.), Trichothecene Mycotoxicosis: Pathophysiologic Effects, vol. I. CRC Press, Boca Raton, FL. 1-26.

Scott, P.M. 1997. Multi-year monitoring of Canadian grains and grain-based foods for trichothecenes and zearalenone. *Food Additives & Contaminants*. 14(4): 333-339.

Shaner, G. 2003. Epidemiology of *Fusarium* head blight of small grain cereals in North America. In: *Fusarium* head blight of wheat and barley. Sous la direction de Leonard, K.J., Bushnell, W.R. St.Paul, APS Press. p. 84-119.

Sinha, R.C., Savard, M.E. 1996. Comparison of immunoassay and gas chromatography methods for the detection of the mycotoxin deoxynivalenol in grain samples. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 18(3): 233-236.

Sobek, E.A., Munkvold, G.P. 1999. European corn borer larvae as vectors of *Fusarium moniliforme*, causing kernel rot and symptomless infection of maize kernels. *Journal of Economic Entomology*. 92(3): 503-509.

Steinkellner, S., Langer, I. 2004. Impact of tillage on the incidence of *Fusarium spp.* in soil. *Plant and Soil*. 267(1-2): 13-22.

Stewart, D.W., Reid, L.M., Nicol, R.W., Schaafsma, A.W. 2002. A mathematical simulation of growth of *Fusarium* in maize ears after artificial inoculation. *Phytopathology*. 92: 534-541.

Sutton, J.C., Baliko, W., Liu, H.J. 1980. Fungal colonization and zearalenone accumulation in maize ears injured by birds. *Canadian Journal of Plant Science*. 60(2): 453-461.

Sutton, J.C. 1982. Epidemiology of wheat head blight and maize ear rot caused by *Fusarium graminearum*. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 4(2): 195-209.

Thomas, D., Buechley, G., Shaner, G. 1999. Epidemiology of *Fusarium* head blight of wheat in Indiana. In: 1999 National *Fusarium* Head Blight Forum. p. 100.

Trail, F., Gaffoor, I., Vogel, S., 2005. Ejection mechanics and trajectory of the ascospores of *Gibberella zae* (anamorph *Fusarium graminearum*). *Fungal Genetics and Biology*. 42(6): 528-533.

Tremblay, G.J., Filion, P., Tremblay, M., Bérard, M., Durand, J., Goulet, J., Montpetit, J.M. 2008. Évolution de la teneur en eau des grains et détermination de la maturité physiologique du maïs-grain (*Zea mays* L.). *Canadian Journal of Plant Science*. 88(4): 679-685.

Tschanz, A.T., Horst, R.K., Nelson, P.E. 1976. The effect of environment on sexual reproduction of *Gibberella zae*. *Mycologia*. 327-340.

Tuite, J.G., Shaner, G., Rambo, G., Foster, J., Caldwell, R.W. 1974. The *Gibberella* ear rot epidemics in corn in Indiana in 1965 and 1972. *Cereal Science Today*. 19: 238-241.

Urry, W.H., Wehrmeister, H.L., Hodge, E.B., Hidy, P.H. 1966. The structure of zearalenone. *Tetrahedron Letters*. 22: 3109-3114.

- Vigier, B., Reid, L. M., Seifert, K.A., Stewart, D.W., Hamilton, R.I. 1997. Distribution and prediction of *Fusarium* species associated with maize ear rot in Ontario. Canadian Journal of Plant Pathology. 19(1): 60-65.
- Vigier, B., Reid, L.M., Dwyer, L.M., Stewart, D.W., Sinha, R.C., Arnason, J.T., Butler, G. 2001. Maize resistance to Gibberella ear rot: symptoms, deoxynivalenol, and yield. Canadian Journal of Plant Pathology. 23(1): 99-105.
- Weaver, G.A., Kurtz, H.J., Behrens, J.C., Robison, T.S., Seguin, B.E., Bates, F.Y., Mirocha, C.J. 1986. Effect of zearalenone on dairy cows. American Journal of Veterinary Research. 47(8): 1826-1828.
- Wild, C.P. 2007. Aflatoxin exposure in low and middle income countries: the critical interface of agriculture and health. Food & Nutrition Bulletin. 28(Supp.2): 372S-380S.
- Wild, C.P., Gong, Y.Y. 2010. Mycotoxins and human disease: a largely ignored global health issue. Carcinogenesis. 31(1): 71-82.
- Windels, C.E. 2000. Economic and social impacts of *Fusarium* head blight: changing farms and rural communities in the Northern Great Plains. Phytopathology. 90(1): 17-21.
- Wong, L.S.L., Tekauz, A., Leisle, D., Abramson, D. McKenzie, R.I.H. 1992. Prevalence, distribution, and importance of *Fusarium* head blight in wheat in Manitoba. Canadian Journal of Plant Pathology. 14(3): 233-238.
- Wu, F., Miller, J.D., Casman, E.A. 2004. The Economic Impact of Bt Corn Resulting from Mycotoxin Reduction. Toxin Reviews. 23(2-3): 397-424.
- Wu, F. 2006. Mycotoxin reduction in Bt corn: potential economic, health, and regulatory impacts. Transgenic Research. 15(3): 277-289.
- Wu, F. 2007. Measuring the economic impacts of *Fusarium* toxins in animal feeds. Animal Feed Science and Technology. 137(3): 363-374
- Xu, X. 2003. Effects of environmental conditions on the development of *Fusarium* ear blight. European Journal of Plant Pathology. 109(7): 683-689.
- Xu, X.M., Berrie, A.M. 2005. Epidemiology of mycotoxicogenic fungi associated with *Fusarium* ear blight and apple blue mould: a review. Food Additives and Contaminants. 22(4): 290-301.
- Xu, X.M., Parry, D.W., Nicholson, P., Thomsett, M.A., Simpson, D. Edwards, S.G., Cooke, B. M., Doohan, F.M., Monaghan, S., Moretti, A., Tocco, G., Mule, G., Hornok, L., Béki, E., Tatnell, J., Ritieni, A. 2008. Within-field variability of *Fusarium* head blight pathogens and their associated mycotoxins. Europe Journal Plant Pathology. 120: 21-34.

Annexe A – Données météorologiques

Tableau I. Températures et des précipitations mensuelles pour chaque site en 2009, 2010 et 2011 et la moyenne des 30 dernières années au Québec, pour la zone 1

Zone 1	Sainte-Martine			Saint-Hyacinthe			Saint-Mathieu-de-Beloeil		
	2011 ¹	30 années en moy. ²	2010 ³	2011 ³	30 années en moy. ³	2009 ⁴	2010 ⁴	2011 ⁴	30 années en moy. ⁵
<u>Température</u>									
		(°C)							
Mai	13,7	13,4	15,7E	-	13,4	12,6	15,5	13,9	13,4
Juin	18,4	18,5	18,4	19,0*	18,6	17,8	18,2	19,5	18,3
JUIL.	21,5*	21,0	23,1*	22,4*	21,1	19,5	22,5	22,5	20,4
Août	19,4*	19,7	20,0*	20,3E	19,7	20,4	20,0	20,2	19,3
Sept.	16,3	14,7	16,6	17,1E	14,5	14,6	15,7	16,9	14,3
Oct.	9,2	8,2	8,1E	10,0E	8,2	6,6	9,0	9,7	8,0
Moyenne	16,41	15,91	16,98	21,04	15,91	15,25	16,81	17,11	15,61
<u>Pluviométrie</u>									
		(mm)							
Mai	148,2	82,1	32,6	-	85,1	97,9	47,5	135,9	80,9
Juin	86,2*	91,0	161,0	2,4*	95,1	105,2	130,9	66,3	91,8
JUIL.	35,2*	91,4	116,6*	52,7*	100,9	132,9	84,4	36,2	99,0
Août	178,6	103,0	60,4*	207,6	103,3	57,4	89,1	150,8	93,4
Sept.	128,3*	98,2	104,4*	162,9	93,9	50,4	133,1	84,2	89,2
Oct.	66,2*	82,5	110,2E	112,3*	89,3	47,3	54,8	82,9	90,5
Totale	642,7	548,2	585,2	537,9	567,6	491,1	539,8	556,3	544,8

¹Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Sainte-Clothilde, Québec.

²Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Sainte-Martine, Québec.

³Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Saint-Hyacinthe, Québec.

⁴Les données météorologiques de la station située à Saint-Hubert.

⁵Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Sainte-Madeleine, Québec.

* = La valeur affichée est basée sur des données incomplètes.

- = Aucune donnée disponible

E = Valeur estimée

Source: adapté de Canadian Normales et moyennes climatiques canadiennes - Environnement Canada, 2013.

Tableau II. Températures et des précipitations mensuelles pour chaque site en 2010 et 2011 et la moyenne des 30 dernières années au Québec, pour la zone 2.

Zone 2	Saint-Alexis			Saint-Edmond		
	2010 ¹	2011 ¹	30 années en moy. ²	2010 ³	2011 ³	30 années en moy. ³
<u>Température</u>						
(°C)						
Mai	15,1E	14,3*	13,1	15,0E	13,4E	12,8
Juin	18,1	17,8*	18,2	18,0	19,2E	17,8
JUIL.	21,9E	20,9*	20,7	22,3	22,2	20,2
Août	18,5*	17,9*	19,2	19,7	20,1E	18,9
Sept.	14,7*	12,4*	13,9	15,7	16,8	13,8
Oct.	6,6*	-	7,5	8,1E	9,3E	7,4
Moyenne	15,81	16,66	15,43	16,46	16,83	15,15
<u>Pluviométrie</u>						
(mm)						
Mai	43,0	84,7*	84,4	59,0	171,0	86,4
Juin	102,0	17,2*	102,9	130,3	108,6	96,9
JUIL.	95,0*	67,8*	90,8	78,2	91,4	102,2
Août	59,7*	170,9*	89,1	93,8	197,8	107,1
Sept.	128,9*	55,9*	85,1	180,6E	133,8*	96,3
Oct.	44,2*	-	84,8	128,4E	95,4*	90,0
Totale	472,8	396,5	537,1	670,3	798	578,9

¹ Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Saint-Jacques, Québec.

² Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Joliette ville, Québec.

³ Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Saint-Guillaume, Québec.

* = La valeur affichée est basée sur des données incomplètes.

- = Aucune donnée disponible

E = Valeur estimée

Source: adapté de Normales et moyennes climatiques canadiennes - Environnement Canada, 2013.

Tableau III. Températures et des précipitations mensuelles pour chaque site en 2009, 2010 et 2011 et la moyenne des 30 dernières années au Québec, pour la zone 3.

Zone 3	Princeville			Saint-Albert			Saint-Augustin			
	2009 ¹	2010 ¹	2011 ¹	30 années en moy. ¹	2010 ²	2011 ²	30 années en moy. ²	2010 ³	2011 ³	30 années en moy. ³
Température										
	(°C)									
Mai	11,0	13,5*	13,3*	11,6	14,9	13,2*	12,9	13,3	10,9	11,2
Juin	16,3	16,9	17,6*	17,1	17,7	18,9*	18,0	16,9	16,8	16,5
JUIL.	18,4*	21,5*	20,7*	19,6	21,8	22,1*	20,3	21,4	20,6	19,2
Août	19,5	19,2*	18,5*	18,4	19,4	20,1*	19,1	19,3	18,6	17,9
Sept.	13,6	15,2*	16,0	13,3	15,5	16,7*	14,2	13,6	15,5	12,5
Oct.	5,7	7,2	8,0*	7,4	7,8	9,7	7,8	6,6	8,2	6,2
Moyenne	14,08	15,55	15,68	14,56	16,18	16,78	15,38	15,18	15,1	13,91
Pluviométrie										
	(mm)									
Mai	121,3	81,1	140,2*	82,1	57,4	140,8*	87,1	39,8	130,3	106,1
Juin	138,2	104,4	88,4	91,0	97,2	86,2	91,1	104,4	86,8	114,2
JUIL.	185,3	99,5	93,1*	91,4	82,6	88,6	97,4	48,8	131,0	127,8
Août	119,1	69,5	194,6*	103,0	87,6	183,8*	94,7	112,0	171,4	116,7
Sept.	80,6	219,1	130,6	98,2	185,4	135,8	79,2	184,8	106,8	125,5
Oct.	113,2	119,3*	82,2*	82,5	105,8	79,3	81,0	60,5	77,9	101,7
Total	757,7	692,9	729,1	548,2	620	714,5	530,5	550,3	704,2	692

¹Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Arthabaska, Québec.

²Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Pierreville, Québec.

³Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à Jean Lesage Intl, Québec.

* = La valeur affichée est basée sur des données incomplètes.

Source: adapté de Normales et moyennes climatiques canadiennes - Environnement Canada, 2013.

Tableau IV. Températures et des précipitations mensuelles pour site L'Assomption en 2009, 2010 et 2011 et la moyenne des 30 dernières années au Québec

	L'Assomption			
	2009 ¹	2010 ¹	2011 ¹	30 années en moy. ¹
<u>Température (°C)</u>				
Mai	11,6	14,9	13,0	12,8
Juin	17,1*	17,5*	18,8	17,6
Juil.	19,1	22,1	22,1	20,3
Août	20,0	19,9	20,1	19,1
Sept.	14,1	15,2	16,5	13,8
Oct.	5,9	7,2	9,1	7,3
Moyenne	14,63	16,13	16,6	15,15
<u>Pluviométrie (mm)</u>				
Mai	98,2	29,2	99,4	80,8
Juin	121,0*	113,4*	117,0	97,4
Juil.	124,0	79,0	64,2*	90,2
Août	51,0	99,4	188,0	94,7
Sept.	51,0	161,0	108,8	91,1
Oct.	94,2	82,0*	92,8*	85,9
Total	539,4	564	670,2	540,1

¹Les données météorologiques de la station d'Environnement Canada située à L'Assomption, Québec.

* = La valeur affichée est basée sur des données incomplètes.

Source: adapté de Normales et moyennes climatiques canadiennes - Environnement Canada, 2013.

Annexe B – Test d'ELISA

Analyse de la toxine DON

La première étape est la préparation des échantillons et de l'extraction. Pour cette étape, 100 ml d'eau distillée sont ajoutés à 10 g de l'échantillon broyé dans 100 ml d'eau distillée. Le tout est agité fortement avec un mélangeur pendant 3 minutes. Ensuite, on laisse reposer les échantillons pendant 2 ou 3 minutes et puis on filtre au moins 5 ml d'échantillon en utilisant un filtre Whatman#1. Il faut faire la même procédure de préparation et d'extraction pour le témoin. À cette étape, les échantillons sont prêts pour commencer le test ÉLISA.

Chaque trousse de DON 5/5 Veratox (gamme de quantification: entre 0.5-6 ppm) contient : 1) 48 micropuits recouverts d'anticorps, 2) 48 micropuits de mélange en rouge, 3) 5 bouteilles étiquetée jaunes de 0, 0,5, 1, 2, et 6 ppm de DON pour les contrôles, 4) 1 bouteille étiquetée bleu d'une solution de conjugué HRP-DON, 5) 1 bouteille étiquetée verte de solution de substrat K-Blue, 6) 1 bouteille étiquetée rouge de la solution d'arrêt rouge (Red Stop solution). La procédure à suivre est bien décrite pour chaque test ÉLISA et les résultats de concentrations en toxine sont obtenus en utilisant un spectrophotomètre avec longueur d'onde de 650 nm.

Analyse de la toxine T2

La préparation des échantillons est faite avec 5 g de l'échantillon broyé qui est ajouté dans 25 ml de méthanol à 70 %. On agite fortement avec un mélangeur pendant 3 minutes. Ensuite, on laisse reposer les échantillons pendant 2 minutes et puis on filtre au moins 5 ml d'échantillon en utilisant un filtre Whatman#1. Ensuite, on dilue 1 ml de chaque échantillon filtré avec 1 ml d'eau distillée et on les mélange à l'aide d'un vortex pendant 2 ou 3 minutes. La même procédure de préparation et d'extraction est répétée pour le témoin. Les échantillons sont alors prêts pour commencer le test ÉLISA.

Analyse de la toxine ZEN

La préparation des échantillons est faite avec 5 g de l'échantillon broyé dans 25 ml de méthanol à 70 %. On agite fortement avec mélangeur pendant 3 minutes. Ensuite, on laisse reposer les échantillons pendant 2 ou 3 minutes et puis on filtre au moins 5 ml d'échantillon en utilisant le filtre Whatman#1. Ensuite, on dilue 1 ml de chaque échantillon filtré avec 4

ml d'eau distillée et on les mélange à l'aide vortex pendant 2 minutes. La même procédure de préparation et d'extraction est répétée pour le témoin. Il faut faire la même procédure de préparation et extraction pour le témoin. Les échantillons sont prêts pour commencer le test ÉLISA.

Analyse de la toxine FUM

Cinq grammes d'échantillon broyé sont ajoutés dans 25 ml de méthanol à 70 % puis agités avec un mélangeur pendant 3 minutes. Les échantillons reposent ensuite pendant 2 minutes puis 5 ml au moins sont filtrés en utilisant un filtre Whatman#1. Ensuite, on ajoute 100 μ L de chaque échantillon filtré dans une bouteille de dilution de la trousse Veratox et on les mélange pendant 2 minutes. Il faut faire la même procédure de préparation et extraction pour le témoin. Les échantillons sont alors prêts pour commencer le test ELISA.