

MARIE-EVE BÉRUBÉ

**EFFET DU GLYPHOSATE SUR LA FUSARIOSE DE
L'ÉPI CHEZ LE BLÉ ET L'ORGE SELON
DIFFÉRENTS TRAVAUX DU SOL**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en biologie végétale
pour l'obtention du grade de Maître ès science (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE PHYTOLOGIE
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2010

Résumé

La fusariose de l'épi est une maladie grave des cultures céréalières du Québec. Il a été établi que la quantité de résidus de culture laissée par le travail du sol et l'application de glyphosate pouvaient augmenter l'intensité de cette maladie. L'objectif de cette étude était de déterminer l'effet du glyphosate, appliqué sur un précédent cultural de soya, sur l'intensité de la fusariose du blé et de l'orge et la production d'inoculum de *Fusarium graminearum* selon trois travaux du sol : labour à l'automne, travail réduit du sol au printemps et semis direct. L'expérience a été répétée sur deux années (2007-2008), à deux stations expérimentales localisées au Québec. Généralement, l'application de glyphosate n'a pas influencé significativement l'intensité de la fusariose ou la production d'inoculum de *F. graminearum*, quel que soit le travail du sol exécuté. En revanche, l'effet du cultivar était fortement significatif. Ce dernier facteur, combiné aux conditions climatiques et à l'inoculum aérien de *F. graminearum* présent au-dessus des parcelles, serait davantage associé à l'intensité de la maladie que l'application de glyphosate.

Avant-propos

Le présent mémoire est constitué de sept chapitres. Le chapitre 1 définit le sujet et mène au chapitre 2, qui présente une revue de littérature portant sur les différents effets répertoriés du glyphosate et du travail du sol sur la fusariose de l'épi. Les hypothèses et objectifs qui découlent de la littérature scientifique existante autour de cette problématique se retrouvent au chapitre 3. Le chapitre 4 constitue le cœur du mémoire et traite de l'effet du glyphosate sur le développement de la fusariose de l'épi du blé et de l'orge selon différents travaux du sol. Ce chapitre a été écrit sous forme d'article scientifique dans le but d'être soumis à la revue « Plant Disease » de l'American Phytopathological Society. Marie-Eve Bérubé en est l'auteure principale, avec Anne Vanasse, Sylvie Rioux, Nicole Bourget, Yves Dion et Gilles Tremblay comme co-auteurs. Le chapitre 5 aborde les variations de la quantité d'inoculum de *Fusarium graminearum* dans l'environnement selon sa provenance, soit des résidus de culture ou de l'air au-dessus de la parcelle, et selon les conditions climatiques. Quant au chapitre 6, celui-ci porte sur les différences de distribution relative et de prédominance des principales espèces de *Fusarium* responsables de la fusariose de l'épi de deux régions distinctes du Québec. Enfin, le chapitre 7 permet de revenir sur les hypothèses de départ de manière à interpréter et expliquer certains résultats.

Les résultats préliminaires de ce projet de recherche ont été présentés sous forme d'affiche au congrès annuel de la Société canadienne d'agronomie (SCA) à Montréal. De plus, plusieurs présentations orales ont été réalisées en rapport avec ces résultats préliminaires, notamment lors du congrès annuel de la Société de protection des plantes du Québec (SPPQ) à Québec, du congrès annuel de la Société canadienne de malherbologie (SCM) à Banff, Alberta, du congrès annuel de l'American Phytopathological Society (APS), à Québec et au 6^e Colloque canadien sur la fusariose, à Ottawa. Toutes ces présentations ont nécessité la rédaction de courts résumés publiés dans les revues scientifiques reliées à ces sociétés. Enfin, les résultats préliminaires de ce projet de recherche ont été présentés aux différents acteurs du monde agricole dans le cadre d'activités d'information organisées par le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ).

Remerciements

Mes tout premiers remerciements sont adressés à ma directrice de recherche Anne Vanasse ainsi qu'à ma co-directrice Sylvie Rioux pour leur soutien et leur disponibilité à mon égard tout au long de cet ambitieux projet de maîtrise. Merci à toi, Anne, de m'avoir offert l'opportunité de travailler avec toi. Tes réflexions, tes conseils et ton sens critique m'ont permis de développer plusieurs des qualités requises pour performer en recherche agronomique. Reste toujours aussi dynamique et passionnée, car c'est ce qui m'inspire le plus chez toi. Merci à toi, Sylvie, d'avoir accepté de seconder Anne, mission que tu as remplie avec brio. Lorsqu'il était question de phytopathologie, tu n'avais pas ton pareil pour répondre à mes interrogations et m'amener vers des pistes que je n'aurais pu soupçonner. Ton sens de l'organisation, ta rigueur scientifique et ton attitude face aux situations stressantes sont pour moi des exemples à suivre dans ma carrière à venir.

Je désire également adresser mes remerciements les plus sincères à tout le personnel de l'Université Laval qui a permis de mettre en place ce projet de maîtrise. Parmi eux, je désire mentionner Francis Gagnon, Denis Marois, Martin Lacroix, Susanne Buhler et Marco Bussières. Je remercie Annie Brégard pour ses conseils plus qu'utiles pour mes analyses statistiques. J'en profite également pour remercier chaleureusement tous les étudiants d'été sans qui de nombreux travaux auraient été beaucoup plus ardues : Nathalie Gagné, Ludovic Bossel, Marie-Laure Marcotte, Yannick Bélanger et Hélène Munger.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance éternelle à toute l'équipe chevronnée qui a contribué au repiquage et à l'identification de ces dizaines de milliers de *Fusarium* récoltés au champ : Annie Brégard, Marie-Laure Marcotte, Marie-Edith Cuerrier, Vanessa Dufresne, Nathalie Gagné, Amélie Lecomte, Alicia Gilbert-Gagnon et, bien sûr, Nicole Bourget, mon mentor et alliée fidèle en matière d'identification des *Fusarium*.

Mes remerciements s'adressent aussi à toute l'équipe du CÉROM de Saint-Mathieu-de-Beloeil pour leur accueil et leur assistance technique au cours des deux étés passés avec eux. Plus particulièrement, j'aimerais remercier Martin Tremblay, Yves Dion et Gilles Tremblay.

Je remercie sincèrement mes amis et tous les membres de ma famille pour avoir continué de croire en moi et de me soutenir tout au long de ma maîtrise : mes parents Roger et Jacqueline, ma sœur Caroline, mon frère Eric et mon beau-frère Jesse. Merci encore Caro d'avoir accepté de me présenter à mon séminaire, c'était parfait!

En terminant, je tiens à remercier mon très cher Simon, qui a rejoint ma vie au milieu de mes études. Il a su être présent pour les derniers milles qui ont sans aucun doute été les plus laborieux pour moi. Son écoute, son calme et sa patience face à mes sautes d'humeur m'ont certainement aidée à terminer le tout en beauté! Merci à tous!

À Florence, grande passionnée des fleurs

Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>ii</i>
<i>Avant-propos</i>	<i>iii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>iv</i>
<i>Table des matières</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>ix</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>x</i>
1. Introduction	1
2. Revue de littérature	2
2.1 La fusariose de l'épi	2
2.1.1 Agents pathogènes responsables	2
2.1.2 Signes et symptômes visuels.....	4
2.1.3 Épidémiologie	4
2.1.3.1 Sources d'inoculum.....	5
2.1.3.2 Dispersion de l'inoculum	6
2.1.3.3 Processus d'infection.....	9
2.1.4 Impacts agronomiques	10
2.2 Le travail du sol	11
2.2.1 Types de travail du sol	12
2.2.2 Effet du travail du sol sur la fusariose de l'épi.....	13
2.3 Le glyphosate	19
2.3.1 Caractéristiques de l'herbicide	19
2.3.2 Comportement dans l'environnement	20
2.3.3 Dégradation microbienne.....	22
2.3.4 Effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi	23
3. Hypothèses et objectifs	27
4. Effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi chez le blé et l'orge selon différents travaux du sol	29
Résumé	29
<i>Effect of glyphosate on fusarium head blight in wheat and barley under different soil tillages</i>	<i>30</i>
Abstract	30
Introduction	31
Materials and Methods	33
Description of sites and treatments	33
Disease measurements	35
<i>F. graminearum</i> inoculum sampling.....	35
Statistical analysis.....	36

Results	37
Weather.....	37
FHB index and FDK	37
DON content and <i>F. graminearum</i> inoculum production	37
Relationship between <i>F. graminearum</i> inoculum and DON content	38
Discussion	39
Acknowledgments	41
Literature Cited	42
5. Caractérisation de la quantité d'inoculum de <i>Fusarium graminearum</i> en provenance des résidus et de l'air selon différentes conditions culturales et climatiques	54
5.1 Introduction	54
5.2 Matériel et méthodes	56
5.2.1 Mise en place des essais.....	56
5.2.2 Prise de données.....	56
5.2.3 Analyses statistiques	58
5.3 Résultats et discussion	59
5.3.1 Caractérisation de l'inoculum en provenance des résidus et de l'air	59
5.3.2 Caractérisation de l'inoculum selon les conditions climatiques.....	62
5.3.3 Relation entre l'inoculum en provenance de l'air et le contenu en DON.....	71
5.4 Conclusion	73
6. Distribution relative et prédominance des principales espèces de <i>Fusarium</i> responsables de la fusariose de l'épi de deux régions du Québec	75
6.1 Introduction	75
6.2 Matériel et méthodes	77
6.2.1 Mise en place des essais.....	77
6.2.2 Prise de données.....	77
6.2.3 Analyse des données	78
6.3 Résultats et discussion	78
6.4 Conclusion	85
7. Discussion générale	86
7.1 Effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi et la production d'inoculum de <i>Fusarium graminearum</i> selon le travail du sol.....	86
7.2 Autres facteurs reliés au développement de la fusariose de l'épi	91
8. Conclusion générale	95
Bibliographie	96
Annexe A – Schéma d'un essai en 2007 et 2008	105
Annexe B – Analyses statistiques	107
Annexe C – Données météorologiques	112
Annexe D – Résultats complémentaires	117

Liste des tableaux

Table 1. Crop residue cover, herbicides applied and cereals sowing and harvesting dates at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloil in 2007 and 2008.	45
Table 2. Monthly temperatures and precipitations for each site in 2007 and 2008 and average of the last 30 years in Quebec.	46
Table 3. FHB index and FDK regarding the herbicide applied on the soybean previous crop for three soil tillages in wheat at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloil (means of 2007 and 2008).	47
Table 4. DON content regarding the herbicide applied on the soybean previous crop for three soil tillages in wheat and barley at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de Beloil (means of 2007 and 2008).	48
Table 5. DON content regarding the interaction between the herbicide applied and the cultivar used in barley/direct drilling trial at Saint-Augustin-de-Desmaures (means of 2007 and 2008).	49
Table 6. DON content regarding the cultivar used for three soil tillages in wheat and barley at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloil in 2007 and 2008. ...	50
Table 7. Daily mean number of <i>F. graminearum</i> colony-forming units (CFU) coming from crop residues during the critical period of infection regarding herbicide effect for three soil tillages in wheat and barley at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloil (means of 2007 and 2008).	51
Table 8. Daily mean number of <i>F. graminearum</i> colony-forming units (CFU) coming from crop residues during the critical period of infection regarding the interaction between the herbicide applied and the sampling year in wheat/mouldboard plough and wheat/direct drilling trials at Saint-Augustin-de-Desmaures.	52
Tableau 9. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies quotidiennement durant la période critique d'infection selon l'orientation de la boîte de Pétri dans le blé et l'orge à Saint-Augustin-de-Desmaures et Saint-Mathieu-de-Beloil, selon trois différents travaux du sol en 2007.	60
Tableau 10. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies quotidiennement durant la période critique d'infection selon l'orientation de la boîte de Pétri dans le blé et l'orge à Saint-Augustin-de-Desmaures et Saint-Mathieu-de-Beloil, selon trois différents travaux du sol en 2008.	61

Liste des figures

Figure 1. Cycle épidémique de la fusariose de l'épi.....	5
Figure 2. Relationship between the daily mean number of <i>F. graminearum</i> colony-forming units (CFU) coming from crop residues during the critical period of infection and DON content.....	53
Figure 3. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais de blé de Saint-Augustin-de-Desmaures en 2007.....	64
Figure 4. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais d'orge de Saint-Augustin-de-Desmaures en 2007.....	64
Figure 5. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais de blé de Saint-Augustin-de-Desmaures en 2008.....	66
Figure 6. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais d'orge de Saint-Augustin-de-Desmaures en 2008.....	66
Figure 7. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais de blé de Saint-Mathieu-de-Beloeil en 2007.	68
Figure 8. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais d'orge de Saint-Mathieu-de-Beloeil en 2007.	68
Figure 9. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais de blé de Saint-Mathieu-de-Beloeil en 2008.	70
Figure 10. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais d'orge de Saint-Mathieu-de-Beloeil en 2008.	70
Figure 11. Relation entre la moyenne quotidienne d'unités formant une colonie (UFC) de <i>F. graminearum</i> mesurée par les boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur des essais durant la période critique d'infection et le contenu en DON.....	72

- Figure 12. Distribution relative de quelques espèces de *Fusarium* durant la période critique d'infection s'étalant du 1er au 11 juillet 2007, à Saint-Augustin-de-Desmaures, selon l'orientation de la boîte de Pétri. 80
- Figure 13. Distribution relative de quelques espèces de *Fusarium* durant la période critique d'infection s'étalant du 4 au 14 juillet 2008, à Saint-Augustin-de-Desmaures, selon l'orientation de la boîte de Pétri. 80
- Figure 14. Distribution relative de quelques espèces de *Fusarium* durant la période critique d'infection s'étalant du 10 au 20 juillet 2007, à Saint-Mathieu-de-Beloeil, selon l'orientation de la boîte de Pétri. 82
- Figure 15. Distribution relative de quelques espèces de *Fusarium* durant la période critique d'infection s'étalant du 5 au 15 juillet 2008, à Saint-Mathieu-de-Beloeil, selon l'orientation de la boîte de Pétri. 82

1. Introduction

Depuis maintenant quelques décennies, la fusariose de l'épi figure dans le haut de la liste des problèmes des producteurs de céréales de l'est du Canada. Il s'agit d'une maladie fongique qui infecte les épis des céréales, dont le blé et l'orge, et qui cause notamment des baisses de rendement et l'accumulation de mycotoxines dommageables pour les animaux d'élevage et les humains (McMullen et coll., 1997). Parmi celles-ci, la mieux connue est le désoxynivalénol (DON), produite par le principal agent pathogène associé à la maladie, *Fusarium graminearum* (Snijders, 1994). Malgré les connaissances continuellement améliorées en lien avec cette maladie, la fusariose de l'épi cause toujours des dommages intenses aux cultures et des pertes monétaires considérables (Windels, 2000). Il en est ainsi parce que l'expression des symptômes et la production de DON sont étroitement dépendantes des conditions climatiques prévalant durant la période critique d'infection des céréales, élément qui, bien sûr, est impossible à contrôler par les producteurs agricoles.

Le seul moyen de minimiser les impacts négatifs du climat sur la fusariose de l'épi est d'optimiser certains facteurs de production. Il existe beaucoup d'informations sur les effets positifs du semis de cultivars de céréales moins sensibles à la fusariose, de l'utilisation de rotations incluant des cultures non-hôtes, de l'enfouissement des résidus de culture et de l'exécution d'un semis hâtif, entre autres. En revanche, l'effet de l'utilisation de certains pesticides sur l'augmentation de la maladie est très peu documenté. Pourtant, des enquêtes récentes réalisées en Saskatchewan ont établi que l'utilisation de glyphosate dans les 18 mois précédant la culture de blé ou d'orge, en combinaison avec un travail réduit du sol, augmente l'intensité de la fusariose de l'épi (Fernandez et coll., 2005; 2007). Cet herbicide est fréquemment utilisé pour réprimer les mauvaises herbes dans les cultures génétiquement modifiées de type *Roundup Ready*TM et risque fortement d'être appliqué l'année précédant une culture de céréales. Étant donné que ces résultats proviennent d'une province aux conditions climatiques beaucoup moins favorables au développement de la maladie, il est primordial de vérifier l'effet de cet herbicide sous un climat plus humide, comme au Québec. Le présent mémoire a pour objectif de répondre à cette question encore peu débattue.

2. Revue de littérature

2.1 La fusariose de l'épi

La fusariose de l'épi est une maladie fongique qui peut survenir chez toutes les céréales cultivées (maïs, seigle, triticales, blé, orge, avoine) (Bailey et coll., 2004). Il s'agit, sans conteste, de la maladie la plus grave affectant les cultures de blé et d'orge de l'est du Canada. Les pertes monétaires encourues dans les années 1990 par les producteurs de blé du Québec et de l'Ontario en raison de la fusariose de l'épi totalisaient 220 millions de dollars US (Windels, 2000). Ces pertes sont causées par des réductions de rendement, mais aussi et surtout par la présence de mycotoxines qui affectent la santé des animaux d'élevage et des humains (McMullen et coll., 1997). C'est pourquoi de nombreux efforts ont été déployés pour tenter de mieux comprendre l'épidémiologie de cette maladie et élaborer de meilleures stratégies de lutte.

2.1.1 Agents pathogènes responsables

De nombreux agents pathogènes du genre *Fusarium* peuvent causer l'expression de symptômes de la fusariose de l'épi chez le blé et l'orge (Bai et Shaner, 1994). Cependant, au Canada comme partout dans le monde, l'espèce la plus associée à la maladie est *F. graminearum* Schwabe [téléomorphe *Gibberella zeae* (Schwein.) Petch] (Bailey et coll., 2004; Gilbert et Tekauz, 2000; Tekauz et coll., 2000). En effet, au Manitoba, le principal champignon isolé d'épillet de blé malades en provenance de champs contaminés par la fusariose de l'épi était *F. graminearum* dans une proportion de 51,9 % (Wong et coll., 1992). De même, une étude menée de 2000 à 2002 dans des champs d'orge sélectionnés dans diverses régions du Québec a permis d'établir que l'espèce la plus fréquemment retrouvée dans les grains infectés était *F. graminearum*, avec une valeur de 41 % en moyenne pour toutes les régions et les années échantillonnées (Bourdages et coll., 2006).

Parmi les autres espèces de *Fusarium* répertoriées au Canada comme agents pathogènes de la fusariose de l'épi chez le blé et l'orge, on retrouve *F. culmorum* et *F. avenaceum*,

auxquels s'ajoutent *F. poae* et *F. sporotrichioides* pour l'orge (Bailey et coll., 2004). Mis à part *F. graminearum* et *F. culmorum*, les autres espèces de *Fusarium* sont généralement moins virulentes (Wong et coll., 1992). Par ailleurs, il est très commun de retrouver une combinaison d'espèces de *Fusarium* pathogènes plus ou moins virulentes dans un même tissu infecté. C'est pourquoi il est souvent question de « complexe » d'infection (Bottalico et Perrone, 2002).

Il existe toutefois une certaine variabilité dans la diversité et la prédominance des espèces de *Fusarium* retrouvées à un endroit donné. Par exemple, en Europe, *F. avenaceum* fait partie des principaux champignons responsables de la fusariose de l'épi, au même titre que *F. graminearum* et *F. culmorum* (Bottalico et Perrone, 2002). Ces différences s'expliquent, en partie, par des variations climatiques qui favorisent l'une ou l'autre des espèces de *Fusarium* liées à la maladie. Une étude réalisée en Hongrie, en Irlande, en Italie et au Royaume-Uni visait à établir des relations entre les espèces de *Fusarium* causant la fusariose de l'épi d'une région donnée et les conditions environnementales prévalant dans cette région. Les chercheurs sont parvenus à établir des conditions optimales pour plusieurs des espèces étudiées. Par exemple, *F. poae* serait favorisé par des conditions relativement plus chaudes et sèches par rapport aux autres *Fusarium*. Quant à *F. avenaceum* et *F. culmorum*, ces espèces ont été davantage associées à des conditions fraîches et humides. Enfin, tel que mentionné dans la littérature, l'incidence de *F. graminearum* est davantage associée à des conditions chaudes et humides (Xu et coll., 2008a). Ces observations concordent avec celles de l'étude de Bourdages et coll. (2006). Ces derniers ont établi que la localisation géographique semblait déterminer la prédominance des espèces de *Fusarium* qu'on y retrouve. Leurs résultats indiquent que *F. graminearum* serait davantage retrouvé dans les régions du sud du Québec, *F. avenaceum*, dans les régions plus à l'est, et *F. poae*, dans les régions situées au nord du fleuve Saint-Laurent. Ils ont également remarqué une forte variation de la présence de *F. graminearum* d'une année à l'autre dans la région de la Capitale-Nationale.

2.1.2 Signes et symptômes visuels

La fusariose de l'épi peut s'attaquer à quelques épis d'un même champ ou ravager la culture en entier, selon l'intensité de l'épidémie. L'infection peut se faire sur quelques épillets seulement ou sur l'épi au complet (Shaner, 2003). Chez le blé, la fusariose de l'épi est plutôt facile à reconnaître. Les épillets infectés se dessèchent prématurément, sont souvent blanchis et stériles. On remarque également la présence d'amas orangés, les sporodochies, et plus rarement, des fructifications de couleur noire, les périthèces. De plus, un mycélium superficiel blanc légèrement teinté d'une couleur orange à rosée peut se retrouver sur les épillets infectés lorsque les conditions sont favorables. Enfin, les grains contaminés sont plutôt ratatinés, petits et de coloration blanchâtre à rosâtre à cause de la présence de mycélium dans le sillon du grain (Bailey et coll., 2004; Shaner, 2003).

Chez l'orge, les épillets infectés par la maladie peuvent parfois être blanchis, tout comme le blé. En revanche, le plus souvent, ils prennent une coloration ocre qui diffère de la couleur paille clair caractéristique des épillets à maturité. Les grains qui en résultent sont légèrement plus fins et petits, mais ces différences sont beaucoup moins marquées que chez le blé. La contamination des grains peut également entraîner une coloration allant de tan à brun foncé, parfois combinée à la présence d'un mycélium rosé à la base du grain, de périthèces noirs et de sporodochies orangées (Bailey et coll., 2004; Steffenson, 2003; Tekauz et coll., 2000). La maladie est beaucoup plus difficile à diagnostiquer chez l'orge que chez le blé parce que les taches brunes présentes sur les épillets infectés peuvent aussi être causées par des maladies foliaires, telles que les rayures réticulées et les taches helminthosporiennes. De plus, les longues barbes caractéristiques de l'orge dissimulent sa présence (Bailey et coll., 2004).

2.1.3 Épidémiologie

Les différentes descriptions du cycle épidémiologique de la fusariose de l'épi retrouvées dans la littérature sont généralement construites autour de *F. graminearum*, l'espèce la plus fréquemment responsable de la maladie partout dans le monde. Ainsi, la présente section traitera uniquement de l'épidémiologie de cet agent pathogène en particulier. Afin de mieux

suivre les explications fournies dans cette partie de la revue de littérature, un schéma du cycle épidémiologique de la fusariose de l'épi est présenté à la figure 1.

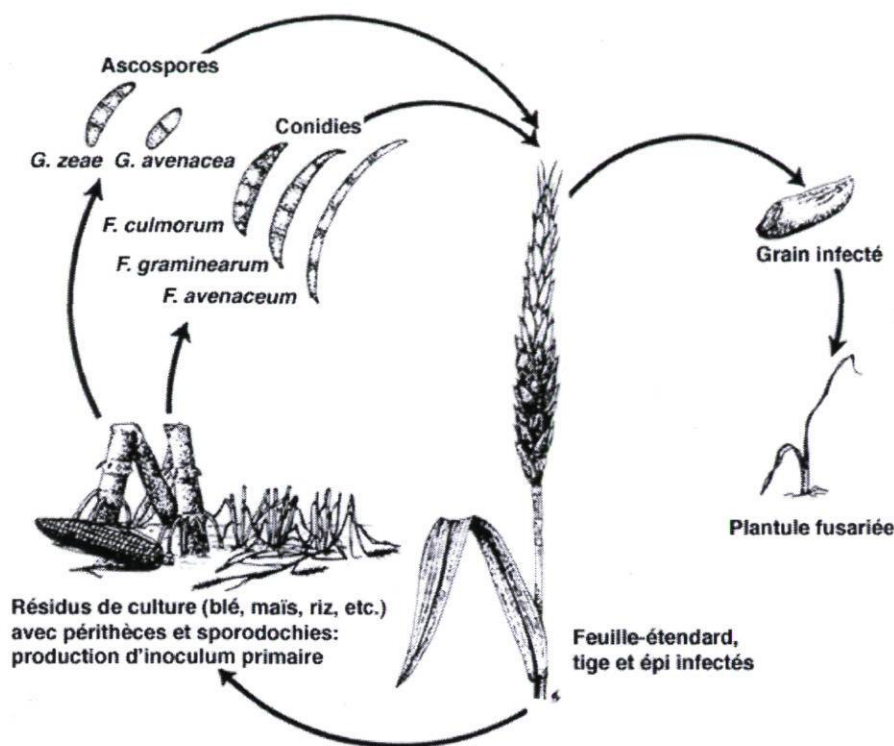


Figure 1. Cycle épidémiologique de la fusariose de l'épi.

Source : adapté de Schmale III et Bergstrom, 2003

2.1.3.1 Sources d'inoculum

Les résidus de culture colonisés par *F. graminearum* et laissés en surface du sol constituent, de loin, la plus importante source d'inoculum de la maladie (Bai et Shaner, 1994; Xu, 2003). Les résidus en provenance de précédents culturaux sensibles à la fusariose de l'épi, comme le maïs, le blé et l'orge, sont reconnus pour être davantage contaminés par le champignon, et ainsi, contribuer de manière plus importante à l'inoculum primaire (McMullen et coll., 1997). Cependant, il est également possible que des résidus de cultures non-hôtes, comme le soya, permettent la conservation de *F. graminearum* (Baird et coll., 1997). Sa conservation est plus longue sur des tissus qui se décomposent moins rapidement, comme les nœuds des tiges de graminées (Sutton, 1982). Les grains infectés tombés au sol au moment de la récolte constituent également une bonne source d'inoculum (Inch et

Gilbert, 2003; McMullen et coll., 1997). Enfin, malgré que leur contribution soit plus ou moins prouvée, le sol (Sutton, 1982), les mauvaises herbes et les plantes indigènes (Bailey et coll., 2004) peuvent également constituer des réservoirs de *F. graminearum* et contribuent à la production subséquente d'inoculum primaire. En somme, malgré qu'un certain inoculum secondaire puisse être produit sur les épis fusariés (Sutton, 1982), la fusariose de l'épi est considérée comme une maladie monocyclique (Fernando et coll., 1997; Madden et Paul, 2009; Shaner, 2003).

L'inoculum primaire de *F. graminearum* peut être constitué d'ascospores, de macroconidies, de chlamydospores et de fragments d'hyphes. Cependant, les ascospores et les macroconidies sont les principales propagules responsables de l'infection (Sutton, 1982). Parmi celles-ci, les ascospores sont les plus fréquemment retrouvées (Inch et coll., 2005). Elles proviennent des périthèces du téléomorphe *G. zaeae*. Quant aux macroconidies, celles-ci sont produites dans les sporodochies, structures de l'anamorphe *F. graminearum* (Bailey et coll., 2004). La production de l'inoculum primaire débute lorsque le champignon est bien implanté (par ses formes de conservation) sur les résidus de culture et que les conditions environnementales propices sont réunies, soient des conditions chaudes et humides qui favorisent le cycle infectieux. Plus précisément, les températures requises pour la production des périthèces et des ascospores se situent entre 13 et 33 °C, avec un optimum autour de 29 °C pour les périthèces et entre 25 et 28 °C pour les ascospores (Sutton, 1982). Pour les macroconidies, les températures oscillent entre 16 et 36 °C, avec un optimum situé entre 28 et 32 °C, ce qui est plutôt similaire aux conditions optimales des autres structures de reproduction (Doohan et coll., 2003).

2.1.3.2 Dispersion de l'inoculum

Contrairement à la production d'inoculum, l'éjection des ascospores et des macroconidies est influencée de manière différente par l'environnement. Alors que des conditions très humides sont requises pour la production de périthèces et d'ascospores, il semble que le rôle de l'eau dans le relâchement des ascospores soit davantage nuancé (Xu, 2003). Par exemple, les quantités d'ascospores retrouvées dans l'air varient selon le moment de la journée. C'est le matin que l'on en retrouve le moins. Par la suite, à partir de la fin de

l'après-midi, on observe une augmentation graduelle des quantités d'ascospores pour atteindre un pic entre 21h00 et 0h00. Le nombre de propagules diminue ensuite durant la nuit jusqu'au matin (Fernando et coll., 2000; Inch et coll., 2005; Paulitz, 1996). Cette augmentation de la quantité d'ascospores dans l'air en début de soirée est corrélée avec la hausse de l'humidité relative de l'air. Paulitz (1996) tente d'expliquer ce phénomène de la façon suivante : les périthèces seraient davantage déshydratés en journée, alors qu'ils seraient réhydratés en soirée avec l'augmentation de l'humidité de l'air. Ce serait donc l'alternance entre ces deux états qui serait responsable de la rupture des périthèces lorsque ceux-ci sont en état de turgescence en soirée, et donc, du relâchement plus abondant d'ascospores à ce moment-là.

Les quantités d'ascospores varient également à l'échelle saisonnière. On a remarqué que celles-ci étaient davantage élevées d'un à quatre jours suivant un épisode de pluie de plus de 5 mm (Fernando et coll., 2000; Inch et coll., 2005; Paulitz, 1996). Cependant, le relâchement d'ascospores était considérablement réduit lors des journées où l'humidité relative était de plus de 80 % ou qu'il tombait plus de 5 mm de pluie (Paulitz, 1996). D'après cette dernière étude, ceci démontrerait que la pluie et l'humidité relative sont effectivement nécessaires pour la production d'inoculum de *G. zea*, mais pas pour leur relâchement, puisque les périthèces deviendraient alors inondés. En ce qui a trait aux températures, le relâchement des ascospores dans l'air est favorisé entre 11 et 23 °C (Sutton, 1982).

Une fois relâchées, les ascospores sont principalement transportées par le vent (Sutton, 1982). Toutefois, la distance réelle parcourue par les ascospores varie selon les études. Fernando et coll. (1997) ont démontré que l'incidence de la fusariose de l'épi diminuait de 90 % dans un rayon de 5 à 22 m à partir d'une source localisée d'ascospores. Il a également été observé que le niveau d'inoculum présent sur des épis de blé provenant de régions caractérisées par plus de 10 % d'intensité de la maladie, dites régions épiphytiques (« epidemic régions »), était significativement plus élevé que dans les régions non épiphytiques et les zones non agricoles éloignées de régions épiphytiques ou non (Francl et coll., 1999). D'après les auteurs, ceci signifierait que les ascospores ne voyageraient pas sur une longue distance. En contrepartie, Schmale III et coll. (2005) ont mesuré des patrons de

distribution spatiale d'ascospores très aléatoires, et ce, autant dans les champs contenant des résidus d'une culture hôte que dans ceux contenant des résidus d'une culture non-hôte. Ceci signifiait que l'inoculum proviendrait de sources aussi bien proches qu'éloignées. Les mêmes conclusions ont été tirées d'une étude qui portait sur les patrons de distribution spatiale de l'incidence de la fusariose de l'épi (Del Ponte et coll., 2003). Ces résultats sont appuyés par les travaux de Maldonado-Ramirez et coll. (2005) qui visaient à mesurer l'abondance relative des spores viables de *G. zeae* dans la couche superficielle de l'atmosphère s'étendant de 50 m à 1 km au-dessus de la surface du sol. Ils ont découvert que les ascospores s'y trouvaient en abondance. Comme il s'agit d'une zone caractérisée par de fortes turbulences de l'air, les ascospores pourraient ainsi être transportées sur de grandes distances. Francl et coll. (1999) précisait d'ailleurs que malgré les niveaux d'inoculum plus élevés sur les épis dans les champs en régions épiphytiques, il était possible de retrouver des spores viables à des endroits éloignés de plusieurs kilomètres de ces régions. Il semblerait donc que les rotations de culture effectuées à l'échelle du champ, mais aussi de la région pourraient contribuer à l'inoculum aérien d'ascospores susceptible de provoquer l'infection des cultures de céréales de cette région (Del Ponte et coll., 2003).

Quant aux macroconidies, plus lourdes que les ascospores (surtout anémophiles), elles ne sont pas vraiment transportées par le vent. Les macroconidies sont pluviatiles (i.e. atteignent les épis par les éclaboussures de pluie – Bailey et coll., 2004) (Champeil et coll., 2004a). Une étude menée par Rossi et coll. (2002) a en effet démontré que la quantité de macroconidies de *Fusarium* spp. (incluant *F. graminearum*) retrouvée dans l'air était nulle ou faible avant un épisode de pluie, mais augmentait graduellement avec la pluie pour atteindre un pic quelques heures après la pluie, alors que l'humidité relative était élevée. Lorsque l'humidité relative chutait, les quantités de macroconidies diminuaient rapidement. En revanche, l'effet de la température sur le relâchement des macroconidies n'était pas assez évident pour tirer des conclusions à ce sujet. Compte tenu de leur mode de transport, les macroconidies ne se déplacent pas sur de grandes distances et contribuent de manière moins importante à la propagation de la maladie que les ascospores (Doohan et coll., 2003), en particulier vers d'autres champs.

Enfin, les insectes et les oiseaux peuvent être des vecteurs de la fusariose de l'épi d'un champ à l'autre en transportant sur eux des ascospores ou des macroconidies (Sutton, 1982). Cependant, leur réelle implication dans la dissémination de la maladie n'est pas connue et probablement négligeable comparativement au vent et à la pluie.

2.1.3.3 Processus d'infection

Même si les macroconidies ou les ascospores sont présentes sur les épis, il n'y aura infection de l'épi et expression de symptômes de la fusariose de l'épi que si leur arrivée coïncide avec la période critique d'infection de la céréale, d'une part, et les conditions environnementales requises pour initier l'infection, d'autre part. De plus, il est évident qu'un cultivar plus sensible à la fusariose de l'épi sera plus sujet à l'infection par *F. graminearum* (Sutton, 1982).

La période critique d'infection du blé correspond à la floraison, plus précisément à la sortie des étamines des épis, ou anthèse (Sutton, 1982). À ce moment, les étamines contiennent de puissants stimulants à la germination des spores de *F. graminearum*, la choline et la bétaine, ce qui augmente les risques d'infection (Schisler et coll., 2006). Cependant, malgré que l'infection ne survienne jamais avant l'anthèse, les épis demeurent réceptifs de la floraison jusqu'au stade du grain pâteux mou (Sutton, 1982), ce qui correspond aux stades Zadoks 60 à 85. Pour ce qui est de la période critique de l'orge, elle est un peu plus difficile à déterminer, étant donné que l'orge fleurit généralement dans la gaine. Il n'y a donc pas de sortie des étamines vers l'extérieur. Néanmoins, l'orge est plus sensible à l'infection durant les deux semaines qui suivent l'épiaison (stade Zadoks 50) et demeure réceptive n'importe quand entre l'épiaison et la maturité (Bailey et coll., 2004).

Les conditions environnementales requises ont surtout été évaluées à partir d'inoculations avec des macroconidies. Cependant, que l'on inocule avec l'un ou l'autre des types de propagules, on obtient des résultats similaires, ce qui permet de supposer que les résultats obtenus avec les macroconidies s'appliquent aux ascospores (Shaner, 2003). L'infection par *F. graminearum* se produit davantage lorsque les températures se situent entre 20 et 30 °C et que les épis sont en présence d'humidité pour une période de 48 à 60 heures (Sutton, 1982). L'optimum d'infection se situe à une température de 25 °C et à une

humidité relative de 100 % (Champeil et coll., 2004a). Il y a donc plus de risques d'infection lorsque la période critique de la céréale coïncide avec des températures chaudes, des conditions pluvieuses ou une humidité relative élevée (Bailey et coll., 2004). Sous des conditions moins propices, l'infection peut tout de même se faire, mais est beaucoup moins rapide à s'établir et de plus faible intensité (Shaner, 2003; Sutton, 1982).

2.1.4 Impacts agronomiques

Un des premiers impacts de la fusariose de l'épi est la baisse de rendement en grains. Celle-ci est due à la stérilité des fleurs entraînée par l'infection par les *Fusarium*. Il y a donc moins de grains formés, ou lorsqu'ils le sont, ceux-ci sont faiblement remplis (Bailey et coll., 2004). Les grains infectés sont ainsi plus légers et peuvent être perdus plus facilement lors du battage à cause de la ventilation. Quant à ceux qui seront malgré tout récoltés, ils entraîneront une masse de grains plus faible, et donc, un rendement plus faible (Bai et Shaner, 1994).

Cependant, le principal problème relié à la fusariose de l'épi est sans nul doute la production de mycotoxines. Il s'agit de métabolites secondaires produits par les champignons colonisant de nombreuses plantes, dont les céréales (ApSimon, 1994). Les mycotoxines sont généralement toxiques pour les animaux et les humains, ce qui explique pourquoi elles sont si nuisibles dans les grains. *F. graminearum*, une des espèces de *Fusarium* les plus virulentes, est responsable en grande partie de la production du désoxynivalénol, mieux connue sous le vocable de DON et qui fait partie de la classe des trichothécènes (Snijders, 1994). Les impacts du DON sur la santé des animaux varient en fonction du degré et du temps d'exposition et de l'espèce animale impliquée. Le porc et autres animaux monogastriques (dont l'humain) sont les plus sensibles, suivis des ruminants, alors que la volaille semble relativement tolérante (Prelusky et coll., 1994). Les principaux symptômes observés sont la perte d'appétit, le refus de se nourrir, les problèmes digestifs (vomissements, diarrhée) et éventuellement la mort, malgré qu'elle survienne très rarement à des niveaux de contamination naturels (Prelusky et coll., 1994).

D'autres espèces de *Fusarium* présentes au Canada produisent des mycotoxines. Parmi celles-ci, mentionnons *F. avenaceum* qui produit la moniliformine, *F. sporotrichioides* qui produit la T-2 et la HT-2 et *F. poae* qui produit le diacétoxyscirpénol (DAS) (Miller, 1994). Les symptômes entraînés par ces mycotoxines chez les animaux sont similaires à ceux produits par le DON, malgré que la T-2 et le DAS soient davantage toxiques (Prelusky et coll., 1994). Même si ces espèces de *Fusarium* ont une aptitude relative plus faible à causer la maladie que *F. graminearum* (qualifiées de peu ou très peu virulentes - Miller, 1994), il est possible qu'elles parviennent à infecter les épis et produire les toxines qui leur sont associées. Des teneurs limites dans les grains ont été établies, notamment pour la T-2, la HT-2 et le DAS (Charmley et Trenholm, 2009).

Les limites recommandées en DON dans les grains au Canada varient selon les normes établies par le gouvernement ou par l'industrie. À ce jour, Agriculture et Agroalimentaire Canada recommande une teneur en DON n'excédant pas 5 ppm dans les grains destinés à l'alimentation des bouvillons et agneaux d'engraissement et de la volaille et 1 ppm pour les porcs, les bovins laitiers et les chevaux (CCG, 2008). En revanche, l'industrie a d'autres normes maximales en DON pour les rations animales : en général, il s'agit de 1 ppm pour la volaille et les porcs, 2 ppm pour les veaux et vaches laitières et 5 ppm pour les bovins de boucherie (Pageau et coll., 2009).

2.2 Le travail du sol

Les nombreuses descriptions du cycle épidémique de la fusariose de l'épi retrouvées dans la littérature démontrent l'importance de la contribution des résidus de culture dans la production de l'inoculum primaire, particulièrement ceux engendrés par les espèces hôtes. Ainsi, il est probable que le type de travail du sol ait une influence sur cette maladie, puisqu'il agit directement sur la couverture de résidus que l'on retrouve au sol, une fois le travail terminé. Les trois principaux types de travail du sol sont le travail conventionnel, le travail réduit du sol et le semis direct.

2.2.1 Types de travail du sol

Le travail conventionnel consiste en une incorporation presque complète des résidus de culture, qui comprend deux étapes : le travail primaire et le travail secondaire. Le travail primaire est généralement réalisé à l'automne à l'aide d'une charrue à versoirs qui retourne complètement le sol sur une profondeur qui peut varier entre 15 et 25 cm, ce qui constitue le labour proprement dit. Le travail secondaire, quant à lui, est exécuté au printemps et n'agit que sur les premiers centimètres de la surface du sol. L'objectif est la préparation du lit de semence et le nivellement du sol. Les outils généralement utilisés pour cette étape sont le cultivateur à dents rigides, le cultivateur à dents vibrantes (vibroculteur) et la herse à disques (CPVQ, 2000a). Le travail conventionnel effectué à l'aide de la charrue à versoirs ne laisse que 6 % de résidus au sol après un passage, peu importe que la culture soit du maïs, du soya ou des céréales (CPVQ, 2000d).

Comme son nom l'indique, le travail réduit du sol, moins intensif que le travail conventionnel, entraîne une incorporation incomplète des résidus de culture. Comme dans le cas du travail conventionnel, ce système de travail du sol comporte un travail primaire réalisé à l'automne et un travail secondaire exécuté au printemps, mais ceux-ci diffèrent légèrement. Le travail primaire va permettre de briser le sol au lieu de le retourner, et ce, par l'utilisation d'autres outils que la charrue : le chisel, le pulvérisateur à disques lourd, etc. Quant au travail secondaire, malgré que ses objectifs soient les mêmes (préparation du lit de semence et nivellement du sol), il est effectué de manière moins agressive à l'aide d'un cultivateur à dents rigides ou d'une herse à disques, le plus souvent. Le vibroculteur peut également être utilisé, mais les risques de bourrage sont plus élevés en raison de la plus grande présence de résidus. D'ailleurs, l'intensité de la couverture de résidus au sol doit être d'un minimum de 30 % pour que la méthode de travail réduit soit reconnue (CPVQ, 2000b).

Enfin, le semis direct permet l'établissement d'une culture sans qu'il n'y ait aucun travail du sol proprement dit, mis à part le semis lui-même. Par conséquent, cette opération laisse un maximum de résidus au sol. Il est à noter que le semoir de type semis direct utilisé est équipé de certaines structures, telles que les tasse-résidus, les ouvre-sillons et les coutres,

qui travaillent le sol superficiellement et minimalement tout en évitant des passages de machinerie supplémentaires (CPVQ, 2000c). Pour donner une idée de la valeur minimale de la couverture de résidus que l'on peut retrouver sous cette méthode, un passage d'un semoir à céréales de type semis direct laissera au sol 80 % de résidus de maïs, 76 % de résidus de soya et 83 % de résidus de céréales, en moyenne (CPVQ, 2000d).

2.2.2 Effet du travail du sol sur la fusariose de l'épi

De nombreuses études ont permis d'établir que les travaux du sol qui laissent plus de résidus en surface du sol sont responsables d'une intensité plus forte de la fusariose dans les champs concernés. McMullen et coll. (1997) expliquent d'ailleurs le nombre plus fréquent d'épidémies de fusariose au cours des dernières décennies en Amérique du Nord par la hausse de popularité des pratiques de conservation des sols. Parmi celles-ci, on retrouve la pratique du travail réduit du sol, qui laisse plus de résidus de culture en surface du sol afin de limiter l'érosion éolienne et hydrique.

Plusieurs chercheurs ont tenté de déterminer la contribution des résidus de culture à la conservation des espèces de *Fusarium* responsables de la fusariose de l'épi selon leur profondeur d'enfouissement dans le sol. Khonga et Sutton (1988) ont évalué la conservation de *G. zae* et la production d'inoculum subséquente de divers types de résidus de maïs et de blé (maïs : tiges et épis; blé : tiges, glumes et grains) placés dans des filets installés et maintenus au-dessus du sol, sur le sol ou dans le sol. Après trois années de séjour au champ, tous les types de résidus placés au-dessus du sol étaient encore colonisés par *G. zae*, alors que le champignon n'était présent que sur quelques types de résidus installés sur le sol. De plus, l'incidence de *G. zae* était plus faible sur les résidus laissés sur le sol comparativement à ceux placés au-dessus du sol. Pour ce qui est des résidus enfouis, *G. zae* était complètement absent de ceux-ci dès la deuxième année de l'expérimentation. Ceci explique pourquoi la production de périthèces, d'ascospores et de macroconidies était inexistante pour les résidus enfouis comparativement à ceux laissés au-dessus ou à la surface du sol (Khonga et Sutton, 1988).

Dans une autre étude, on a également été en mesure de confirmer que le taux de survie de *G. zeae* était meilleur sur les nœuds de tiges de blé laissés à la surface comparativement à ceux enfouis, après deux ans de séjour au champ, soit : 38,5 % pour les résidus non enfouis et 15,6 à 18,2 % pour ceux enfouis. De même, la production d'ascospores par les résidus non enfouis déclinait moins rapidement et persistait plus longtemps par rapport aux résidus enfouis (Pereyra et coll., 2004). Pour tenter d'expliquer ces différences, les chercheurs de cette étude ont aussi calculé le taux de décomposition des résidus selon qu'ils étaient enfouis ou non. Les résidus de tiges de blé enfouis étaient décomposés à 99 % après les deux années de l'expérimentation comparativement à 75 % pour les résidus laissés en surface. Comme les résidus laissés à la surface du sol se décomposent moins rapidement, ils permettent la conservation de *G. zeae* sur une plus longue période. Par conséquent, le champignon est plus sujet à produire de l'inoculum, et donc, à infecter les cultures sensibles. De plus, les résidus enfouis contiennent moins de composés solubles et plus de lignine, ce qui est défavorable à la croissance et à la conservation de *G. zeae*. Le champignon est donc graduellement remplacé par des espèces de *Fusarium* plus saprophytiques et davantage adaptées aux tissus plus décomposés, tels que *F. solani* et *F. oxysporum* (Pereyra et coll., 2004).

Des résultats similaires ont été obtenus au Manitoba avec des grains de blé plutôt qu'avec des tiges. Après environ un an, la biomasse de grains fusariés laissés au sol avait seulement diminué de 50 %, alors que les grains qui avaient été enterrés à 5 ou 10 cm étaient presque entièrement décomposés (moins de 7 % de la biomasse initiale). Cependant, même après deux ans, *G. zeae* était encore autant isolé des grains fusariés enfouis que de ceux laissés en surface (Inch et Gilbert, 2003). De plus, même si les grains fusariés laissés à la surface étaient les seuls capables de produire des ascospores, des périthèces étaient présents sur les grains, peu importe leur profondeur d'enfouissement. Pereyra et coll. (2004) avaient également observé que les résidus enfouis étaient encore en mesure de produire des ascospores après deux ans, quoique en plus faible quantité. Normalement, il existe une plus forte présence d'humidité dans le sol qui peut favoriser certaines espèces de champignons antagonistes à *G. zeae*, et donc, nuire à sa conservation sur les résidus de culture enfouis dans le sol (Khonga et Sutton, 1988). Dans le cas des travaux d'Inch et Gilbert (2003), les conditions climatiques plus sèches qui ont prévalu au Manitoba lors de leur

expérimentation auraient permis aux grains fusariés enfouis de demeurer de bons substrats. Ainsi, même si le travail conventionnel permet de réduire considérablement la production d'inoculum menant à la fusariose, il faut veiller à ne pas remonter les résidus enfouis à la surface, car *G. zae* peut encore être présent et se remettre à produire des spores une fois exposé à l'air ambiant (Inch et Gilbert, 2003; Pereyra et coll., 2004).

D'autres travaux ont porté sur la diversité et la longévité de la population microbienne sur des résidus de soya laissés en surface par un semis direct en Indiana (Baird et coll., 1997). Même si le soya est considéré comme une culture non-hôte à la fusariose, *Fusarium* était l'un des genres les plus retrouvés sur les résidus de culture. Pour une des deux années d'échantillonnage, l'espèce *F. graminearum* comptait pour 52,1 % des espèces de *Fusarium* identifiées. Cependant, la présence du champignon variait selon le moment de l'année, le type de résidus et l'année d'échantillonnage. La plupart des autres espèces de *Fusarium* détectées étaient davantage saprophytiques. Les chercheurs ont conclu que les résidus de culture de soya laissés par le semis direct peuvent constituer une source non négligeable de *F. graminearum* et potentiellement contribuer à l'infection des cultures sensibles comme le blé et le maïs. Par contre, deux autres études réalisées en Ontario (Miller et coll., 1998) et au Minnesota (Dill-Macky et Jones, 2000) ont démontré que même si *F. graminearum* était présent sur les résidus de soya, cette proportion était bien moindre comparativement aux résidus de cultures hôtes.

Suite aux études qui ont prouvé l'importance de la contribution des résidus de culture sur la conservation et la production d'inoculum de *G. zae*, plusieurs recherches ont porté sur l'effet du travail du sol sur la fusariose de l'épi proprement dite. Les travaux de Dill-Macky et Jones (2000) ont démontré une diminution significative du contenu en DON des grains, de l'incidence (proportion (en %) d'épis infectés) et de la gravité (proportion (en %) d'épillets fusariés par épi infecté) de la fusariose de l'épi lorsque la charrue était utilisée par rapport au chisel et au semis direct. Cependant, aucune différence n'a pu être faite entre le chisel et le semis direct. D'après les auteurs, même si le semis direct laisse plus de résidus, la stratification de ceux-ci pourrait mener à une diminution du contact entre le sol et les débris et à la formation d'un microclimat défavorable à *G. zae*, le rendant ainsi comparable au travail réduit quant à son effet sur la maladie. Par ailleurs, une autre étude a

révélé que la proportion de grains d'orge fusariés était significativement plus élevée sous un travail réduit comparativement au travail conventionnel et au semis direct (Fernandez et coll., 2007). Les effets du chisel et du semis direct sur la fusariose de l'épi semblent donc varier d'une étude à l'autre.

Toutefois, l'effet du travail du sol se fait souvent sentir en combinaison avec d'autres facteurs qui influencent la fusariose de l'épi. Un de ces facteurs de production est le précédent cultural. Toujours dans l'étude de Dill-Macky et Jones (2000), le travail conventionnel avait bel et bien diminué le contenu en DON des grains, l'incidence et la gravité de la maladie lorsque les résidus étaient du maïs, mais cet effet devenait négligeable lorsqu'il s'agissait de résidus de soya. Des résultats similaires ont été obtenus dans le blé d'hiver, où le semis direct menait à des concentrations de DON significativement supérieures aux autres travaux du sol lorsque le précédent cultural était du blé d'hiver au lieu de la betterave à sucre (Koch et coll., 2006). Les résidus de cultures non-hôtes laissés à la surface seraient donc moins contributives au développement de la maladie chez le blé et l'orge.

D'après les résultats de Schaafsma et coll. (2005), une interaction entre le précédent cultural, le travail du sol et la grandeur du champ s'est révélée significative. Les champs de grande superficie où du maïs avait été cultivé l'année précédente sous semis direct ou travail réduit étaient caractérisés par un plus fort indice de fusariose ((incidence × gravité) / 100) et une plus haute concentration de DON comparativement aux champs plus petits, sous travail conventionnel et avec un précédent cultural non-hôte. La proportion de grains infectés par *F. graminearum* était, quant à elle, plus élevée dans les grands champs sous semis direct avec du maïs comme précédent cultural par rapport aux autres traitements. Teich et Hamilton (1985) ont aussi rapporté que l'enfouissement des résidus de maïs avait permis une réduction significative du nombre d'épis de blé infectés au champ. Le maïs est une culture hôte qui produit une plus grande quantité de résidus que les céréales à paille, ce qui peut expliquer ces résultats (Schaafsma et coll., 2001).

Les conditions climatiques favorables au développement de la maladie interagissent également de manière considérable avec l'effet du travail du sol. D'après l'étude de

Champeil et coll. (2004b), le semis direct menait à une gravité plus élevée de la maladie chez le blé d'hiver comparativement au travail conventionnel, mais seulement pour l'année 2000, caractérisée par une forte présence de la fusariose. Toujours en 2000, le contenu en DON était huit fois plus élevé lorsque le semis direct était pratiqué par rapport au travail conventionnel, comparativement à deux fois plus élevé en 2002. Les travaux de Koch et coll. (2006) ont également rapporté un effet significatif du semis direct sur la concentration en DON par rapport aux autres types de travail du sol, mais seulement en 2002, alors que la maladie avait causé beaucoup de dommages. Un autre essai mené à Normandin, au Québec, a démontré que le semis direct provoquait de plus grandes concentrations de DON dans les grains d'orge en comparaison aux travaux conventionnel et réduit, mais pour une seule des deux années analysées (Pageau et coll., 2005). Dans une autre expérience répétée sur quatre ans, il n'y a eu qu'une année où le travail réduit menait à une concentration en DON significativement plus élevée que le travail conventionnel et le semis direct. Cette année en suivait une autre où il y avait eu une épidémie de fusariose (Schaafsma et coll., 2001). Enfin, dans l'étude de Fernandez et coll. (2005), la gravité de la fusariose était plus élevée dans les champs en travail réduit et plus faible dans ceux en semis direct, mais de manière significative pour une année sur quatre seulement. Les conditions climatiques prévalant d'une année à l'autre avaient été identifiées comme étant le principal facteur d'influence sur la maladie, ce qui a été statué par d'autres équipes de chercheurs (Koch et coll., 2006; Miller et coll., 1998; Schaafsma et coll., 2001).

À un moindre degré, on a également observé une interaction entre le travail du sol et la sensibilité du cultivar. Dans une étude, le travail réduit n'a eu un effet significatif sur la concentration en DON des grains de blé d'hiver qu'avec l'utilisation d'un cultivar très sensible (Koch et coll., 2006). Des résultats semblables ont été obtenus chez l'orge : les cultivars sensibles avaient un indice de fusariose plus faible sous une régie de travail conventionnel, alors que ceux de résistance intermédiaire étaient moins atteints par la fusariose sous un semis direct comparativement au travail réduit (Fernandez et coll., 2007).

Enfin, quelques études n'ont rapporté aucun effet significatif du travail du sol sur la fusariose de l'épi. L'enquête réalisée par Teich et Nelson (1984) sur l'influence de pratiques culturales sur la fusariose de l'épi en Ontario n'a pas permis de voir un effet

significatif du travail du sol sur la maladie. Selon une autre étude, le taux d'infection des grains de blé et de maïs ne différait pas significativement selon qu'ils provenaient de champs avec ou sans labour (Miller et coll., 1998). Les conditions climatiques et la sensibilité du cultivar, entre autres, seraient des facteurs qui influenceraient davantage l'apparition de la maladie. De plus, malgré que ces chercheurs soient parvenus à démontrer que les résidus des parcelles sans labour contenaient une plus forte proportion des souches de *F. graminearum* inoculées au départ, ils ont conclu que les autres souches en provenance de l'extérieur du champ contribuaient aussi au développement de la maladie. La présence de grandes superficies de maïs dans une région donnerait également l'effet du travail du sol (Miller et coll., 1998; Schaafsma et coll., 2001).

En terminant, mentionnons que le travail du sol peut également avoir une influence sur l'incidence et la diversité de plusieurs espèces de *Fusarium* retrouvées directement dans le sol. Steinkellner et Langer (2004) sont en effet parvenus à démontrer que l'utilisation du chisel menait à une plus grande diversité de *Fusarium* spp. dans le sol, dont une plus forte présence de *F. graminearum*, comparativement à l'utilisation de la charrue. De plus, moins le travail du sol était fait en profondeur, plus l'incidence et la diversité des espèces de champignons reliées à la fusariose étaient élevées. D'après eux, l'utilisation du chisel à une faible profondeur favoriserait une plus grande quantité d'humus en surface, et donc, une plus grande activité microbienne, ce qui expliquerait les différences d'incidence et de diversité observées entre les deux travaux du sol. Cependant, malgré le nombre plus élevé de propagules de *F. graminearum* dans les parcelles travaillées avec le chisel, le contenu en DON des grains ne variait pas avec le type de travail du sol.

Des conclusions similaires découlent des travaux réalisés par Sturz et Johnston (1985). Le nombre de propagules de *F. graminearum*, *F. avenaceum* et *F. sporotrichioides* était plus élevé lorsqu'il y avait présence de chaume de blé à la surface du sol comparativement à un sol laissé en jachère. La majorité des propagules isolées ont été associées à la fraction organique du sol. Toutefois, la présence de plusieurs espèces de *Fusarium* pathogènes dans le sol ne pouvait expliquer seule la forte incidence de la fusariose de l'épi autant dans les champs avec chaume qu'en jachère. Le lien entre la présence de *F. graminearum* dans le sol et l'intensité de la fusariose n'a donc pu être prouvé.

2.3 Le glyphosate

Avec la hausse de popularité des pratiques de conservation des sols, on observe également une utilisation accrue du glyphosate. Cet herbicide devient un outil pratiquement incontournable pour réprimer les mauvaises herbes en travail réduit du sol et en semis direct, car le désherbage mécanique est limité ou impossible. De plus, la culture de plantes transgéniques résistantes au glyphosate sous ces modes de travail du sol entraîne une utilisation plus abondante de cet herbicide. Comme il a été démontré que *F. graminearum* était davantage présent lorsqu'il y a des résidus de culture au sol, il devient justifié de connaître l'effet du glyphosate sur ce champignon en particulier.

2.3.1 Caractéristiques de l'herbicide

Le nom chimique du glyphosate est le N-(phosphonométhyl)glycine et sa formule moléculaire est $C_3H_8NO_5P$ (Franz, 1985). Il s'agit d'un acide organique faible (Mensink et Janssen, 1994) qui est généralement combiné à l'isopropylamine dans les préparations commerciales afin de former un sel très soluble dans l'eau facilitant ainsi l'application du produit. La préparation commerciale *Roundup*TM, commercialisée par la compagnie Monsanto Inc., est composée de sel d'isopropylamine à une concentration de 480 g/litre, ce qui équivaut à 360 g/litre de glyphosate seul (Mensink et Janssen, 1994).

Le glyphosate est un herbicide à large spectre, c'est-à-dire qui attaque la plupart des mauvaises herbes annuelles ou vivaces. Il est peu toxique pour les organismes non visés et possède une très forte activité lorsqu'il est utilisé en post-levée. Par contre, il ne possède aucune activité résiduelle dans les sols, ce qui limite son utilisation en pré-levée. Il s'agit d'un herbicide systémique qui est transloqué rapidement partout dans la plante traitée (Franz, 1985). Malgré que le glyphosate puisse agir de multiples façons dans la plante, son principal mode d'action touche la biosynthèse des acides aminés aromatiques. Il est un inhibiteur compétitif de l'enzyme 5-énolpyruvylshikimate acide-3-phosphate synthase (EPSPS). Cette enzyme est impliquée dans la formation des acides aminés aromatiques essentiels pour la fabrication des protéines chez les plantes (Cole, 1985).

2.3.2 Comportement dans l'environnement

Comme il vient d'être mentionné, le glyphosate n'a pas de réelle activité résiduelle dans les sols. Ceci s'explique par le fait qu'il est rapidement adsorbé par le sol, ce qui inactive son activité herbicide et limite grandement sa mobilité en profondeur (Torstensson, 1985). L'adsorption du glyphosate par le sol est due à de nombreux facteurs édaphiques. Parmi ceux-ci, les minéraux argileux dans le sol sont associés à une certaine adsorption du glyphosate. Elle est attribuable à la formation de complexes stables entre le glyphosate et des cations polyvalents retenus aux sites d'échanges des minéraux argileux, particulièrement ceux de type 2/1 (Piccolo et coll., 1994). De plus, la nature du cation impliqué influence la capacité d'adsorption de l'argile : en général, les cations monovalents comme Na^+ et K^+ permettent une légère augmentation de l'adsorption, alors que les cations bi- et trivalents comme Cu^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} sont beaucoup plus efficaces (Glass, 1987; Sprankle et coll., 1975). Ce mécanisme d'adsorption se manifeste lorsque le glyphosate est présent en faible concentration dans le sol (Piccolo et coll., 1994).

Cependant, l'adsorption du glyphosate sur les minéraux argileux est également causée par un échange de ligands avec des hydroxydes de fer et d'aluminium exposés en bordure des minéraux argileux (Gimsing et Borggaard, 2002). L'adsorption du glyphosate se fait par l'échange d'un groupement hydroxyle (OH^-) de la sphère d'hydratation d'un hydroxyde de fer ou d'aluminium avec un groupe P-O^- du groupement phosphaté caractéristique du glyphosate (Piccolo et coll., 1992; 1994). Ce phénomène a d'ailleurs été observé avec la goethite et la gibbsite, deux roches composées essentiellement d'hydroxydes de fer et d'aluminium, où l'adsorption du glyphosate était supérieure comparativement aux minéraux argileux en raison d'un plus grand nombre de groupements hydroxyles (Gimsing et Borggaard, 2002). L'échange de ligands avec les hydroxydes de fer et d'aluminium est un mode d'adsorption du glyphosate prépondérant lorsque l'herbicide est en forte concentration dans le sol (Piccolo et coll., 1994).

La matière organique du sol joue aussi un rôle dans l'adsorption du glyphosate. On remarque d'abord que les substances humiques saturées de cations tels que Cu^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} permettent une très bonne adsorption du glyphosate, tout comme les minéraux argileux

(Morillo et coll., 2000; Piccolo et coll., 1992; Sprankle et coll., 1975). Cependant, on observe également la formation de liens moins forts, les ponts hydrogènes, entre le groupement phosphaté du glyphosate et les substances humiques (Miano et coll., 1992). Par contre, l'adsorption par le biais de ce mécanisme est beaucoup plus variable, étant donné que le nombre de ponts hydrogènes formés est dépendant de la structure macromoléculaire et de la dimension des substances humiques (Piccolo et coll., 1996). Enfin, lorsque le glyphosate est présent en forte concentration, de faibles ponts hydrogènes sont également susceptibles de se former entre les molécules de glyphosate elles-mêmes (Piccolo et coll., 1992).

De plus, il est important de souligner que le glyphosate, en raison de son groupement phosphaté, peut entrer en compétition pour les sites d'adsorption avec le phosphore inorganique du sol. Celui-ci est d'ailleurs généralement favorisé par rapport au glyphosate (Gimsing et Borggaard, 2002). Même dans les sols fortement adsorbants, le glyphosate subit une désorption non négligeable. Ainsi, le lessivage du glyphosate peut survenir si celui-ci n'a pas eu le temps d'être dégradé avant d'être relâché par le sol (Piccolo et coll., 1994).

Il existe peu d'information concernant la présence du glyphosate dans les résidus de culture non décomposés (Grossbard, 1985). Une étude réalisée dans l'Ouest canadien a permis de démontrer qu'une application de glyphosate en pré-récolte du blé afin d'accélérer la maturité entraînait une certaine accumulation de l'herbicide dans le chaume de blé. La concentration de glyphosate augmentait lorsque le taux d'application était plus élevé. Par contre, le chaume de blé en provenance de sites d'expérience où la pluviométrie était plus élevée contenait beaucoup moins de glyphosate (Cessna et coll., 1994). La pluie agit sur deux plans. D'abord, elle limite l'absorption de l'herbicide par la plante traitée lorsqu'elle survient rapidement après l'application en lessivant le produit du feuillage. Ensuite, elle provoque, sur une base cumulative saisonnière, le lessivage du glyphosate présent à l'intérieur des résidus desséchés, puisque l'herbicide est très soluble dans l'eau (Cessna et Waddington, 1995). Cependant, si l'on récupère la paille d'une culture de blé ayant été traitée avec du glyphosate plutôt que de la laisser au champ, celle-ci peut contenir du glyphosate à une concentration allant jusqu'à 60 ppm (Gilbert et coll., 2006). Enfin,

concernant la culture de plantes transgéniques résistantes au glyphosate, il a été démontré en Argentine qu'elles pouvaient contenir une certaine quantité de glyphosate quelques mois après l'application, de même que des métabolites secondaires. Ceci signifie qu'il y a eu dégradation de l'herbicide à l'intérieur de la plante. On en retrouvait davantage dans les feuilles et les tiges que dans les graines. Toutefois, les concentrations retrouvées étaient plutôt faibles et dépendaient du nombre d'applications (Arregui et coll., 2003).

2.3.3 Dégradation microbienne

Il a été dit précédemment qu'en raison de la désorption susceptible de se produire dans les sols, le glyphosate doit être dégradé afin d'éviter qu'il soit lessivé. Cette dégradation est essentiellement d'origine microbienne, les réactions chimiques n'exerçant qu'un faible rôle (Rueppel et coll., 1977; Sprankle et coll., 1975; Torstensson et Aamisepp, 1977). En effet, dans toutes ces études, la dégradation du glyphosate était presque complètement inhibée lorsque l'échantillon de sol analysé avait été stérilisé. Cette dégradation peut être plus ou moins rapide. Ceci dépendrait du niveau d'activité microbienne ou du pouvoir adsorbant du sol impliqué (Sprankle et coll., 1975; Torstensson, 1985). Le principal métabolite secondaire retrouvé est l'acide aminométhylphosphonique (AMPA), également biodégradable (Rueppel et coll., 1977). Parmi les groupes d'organismes impliqués, on retrouve notamment les bactéries (Torstensson, 1985), mais aussi les champignons (Krzyśko-Łupicka et Orlik, 1997). Certains chercheurs ont établi que la biodégradation s'effectuait essentiellement par co-métabolisme, ce qui signifie que les nutriments dégagés du glyphosate ne supportent pas la croissance microbienne (Rueppel et coll., 1977; Sprankle et coll., 1975; Torstensson et Aamisepp, 1977). Cependant, ces affirmations sont contredites par une étude réalisée au Brésil, qui rapporte que l'application de glyphosate augmente la respiration cellulaire et le nombre d'actinomycètes et de champignons dans les sols traités (Araújo et coll., 2003).

Parmi les champignons du sol responsables de la dégradation du glyphosate, le genre *Fusarium* est l'un des plus impliqués (Krzyśko-Łupicka et Orlik, 1997). En effet, il persiste lorsque la seule source de phosphore disponible est le glyphosate, ce qui signifie qu'il le dégrade et l'utilise pour sa croissance. Cependant, celle-ci est limitée comparativement à un

milieu de culture contenant une source pure de phosphore (Krzyśko-Łupicka et Sudol, 2008). Krzyśko-Łupicka et Orlik (1997) ont évalué le pouvoir de dégradation du glyphosate par plusieurs groupes de champignons parmi lesquels se retrouvait le genre *Fusarium*. Suite à leurs observations, le principal métabolite retrouvé est l'AMPA. Toutefois, des études portant uniquement sur le pouvoir de dégradation du glyphosate par le genre *Fusarium* ont révélé que l'AMPA n'était pas produit conformément à la voie de dégradation traditionnellement expliquée (Castro Jr et coll., 2007; Sudol et Krzyśko-Łupicka, 2005). Normalement, la formation d'AMPA est liée à la présence de glycine et d'ions orthophosphatés. Or, ceux-ci n'ont pas été détectés lors de la biodégradation par différentes souches de *Fusarium* (Sudol et Krzyśko-Łupicka, 2005). Il est possible que *Fusarium* spp. utilisent certaines enzymes capables de briser les liens C-P sans formation d'AMPA (Castro Jr et coll., 2007).

2.3.4 Effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi

Ce sujet n'est que très peu abordé dans la littérature. Quelques études *in vitro* ont été réalisées afin d'évaluer la croissance de *F. graminearum* sur des milieux de culture contenant du glyphosate.

Jeffery et Burgess (1990) ont mesuré le taux de croissance de *F. graminearum* sur trois milieux de culture différents auxquels on avait ajouté diverses quantités de glyphosate représentatives des doses appliquées au champ. Quel que soit le milieu de culture, la température ou la pression osmotique, le glyphosate n'a pas affecté le taux de croissance des colonies de *F. graminearum*. D'après eux, il est peu probable que le glyphosate ait des conséquences réelles sur cet agent pathogène dans les conditions au champ.

Quelques expériences plus récentes ont mené à des résultats divergents (Hanson et Fernandez, 2002; 2003). Dans ces expériences, les espèces *F. graminearum* et *F. avenaceum* ont été évaluées. Dans Hanson et Fernandez (2002), l'expérience visait à évaluer l'effet de quelques préparations commerciales de glyphosate et de diverses concentrations de l'herbicide sur la croissance de ces deux champignons responsables de la fusariose de l'épi. Encore une fois, les concentrations de glyphosate testées étaient

représentatives des doses appliquées par les producteurs. Après quelques jours d'incubation, la croissance fongique semblait stimulée par certaines préparations ou concentrations du glyphosate, alors qu'elle était plutôt réduite par d'autres (Hanson et Fernandez, 2002). La deuxième expérience réalisée par la même équipe de chercheurs (Hanson et Fernandez, 2003) était encore plus convaincante : la majorité des préparations de glyphosate testées permettaient une augmentation de la croissance de *F. graminearum* allant jusqu'à 22 % de plus que le témoin. Quant à *F. avenaceum*, toutes les préparations ont permis une augmentation de croissance allant de 6 à 21 % de plus que le témoin. La plupart du temps, la concentration utilisée n'avait que peu d'influence sur la croissance fongique (Hanson et Fernandez, 2003).

Les conclusions tirées des études réalisées *in vitro* doivent cependant être considérées avec une certaine précaution. En effet, ces tests ne peuvent tenir compte des conditions réelles rencontrées dans le champ (Jeffery et Burgess, 1990). Il est donc impossible de statuer sur l'effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi en se fiant uniquement aux tests effectués en laboratoire.

Heureusement, quelques articles apportent de l'information concernant l'effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi dans des conditions au champ. En Norvège, il a été démontré qu'une application de glyphosate l'automne précédant la culture d'avoine n'avait pas influencé la proportion de grains d'avoine infectés par la fusariose l'année suivante (Henriksen et Elen, 2005). D'après les auteurs, ceci pourrait être expliqué par la présence d'autres facteurs qui auraient masqué l'effet du glyphosate, de même que l'utilisation d'un seul site d'expérimentation. Cependant, certains chercheurs ont observé une diminution de la fusariose de l'épi chez le blé de printemps et le blé dur suite à une dérive de glyphosate non prévue (Hansen et coll., 2004). L'incident est survenu dans des parcelles destinées à l'amélioration génétique des cultivars de blé de printemps et de blé dur dans le Dakota du Nord. Celles-ci se trouvaient à proximité de parcelles ensemencées en soya *Roundup Ready*TM. Une application de glyphosate a eu lieu sur le soya alors que le vent soufflait en direction des parcelles de blé. Celles-ci ont donc reçu une dérive de glyphosate. La dose était toutefois plutôt faible, puisqu'elle n'a pas causé la mort d'aucune plante. Suite à cela, l'évaluation visuelle de la maladie sur les épis a été effectuée et a révélé que les épis en

provenance de la bande la plus près de la dérive présentaient moins de symptômes de fusariose que ceux qui n'avaient pas reçu de glyphosate. Par exemple, la gravité de la fusariose du blé de printemps se trouvant loin de la dérive se situait entre 39,7 et 49,8 %, alors qu'elle n'était que de 17,9 à 27,8 % pour le blé localisé près de la dérive (Hansen et coll., 2004). Il ne semblait pas y avoir d'autres facteurs pour expliquer ces variations. Cependant, compte tenu des circonstances, cette expérience mériterait d'être refaite en conditions expérimentales contrôlées permettant une répétition des traitements.

Comme dans le cas des expériences *in vitro*, la contradiction règne parmi les résultats rapportés par les études réalisées au champ. Suite à une enquête réalisée par Fernandez et coll. (2005) visant à évaluer l'impact de quelques facteurs de production sur la fusariose de l'épi du blé en Saskatchewan, il a été établi que le glyphosate avait un effet significatif sur le développement de la fusariose de l'épi sous certaines conditions. Plus précisément, l'application d'au moins une dose de glyphosate dans les 18 mois précédant la culture de blé, en combinaison avec le travail réduit du sol, a mené à une hausse significative de l'indice de fusariose, mais aussi du nombre de grains infectés, pour toutes les années d'enquête. Le même genre d'enquête a également été réalisé pour l'orge (Fernandez et coll., 2007). L'application d'herbicides du groupe 9 (soit le glyphosate) a été associée à un indice de fusariose attribuable à *F. avenaceum* significativement plus élevé en travail réduit du sol. En semis direct, c'est l'indice total de fusariose, de même que celui attribuable à *F. graminearum* et *F. sporotrichioides*, qui était augmenté de manière significative. Quant au travail conventionnel, l'indice total de fusariose et ceux attribuables à *F. poae* et *F. sporotrichioides* étaient significativement plus élevés avec une application de glyphosate. Toutefois, il a été précisé que la corrélation entre le nombre d'applications de glyphosate précédant la culture d'orge et l'indice de fusariose associé à *F. graminearum* et *F. avenaceum* n'était significative que lorsque les cultivars étaient de sensibilité intermédiaire à la fusariose. D'après les auteurs, ceci signifierait que la sensibilité du cultivar serait un facteur qui surpasserait l'effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi (Fernandez et coll., 2007). Malheureusement, les auteurs de ces deux articles ne sont pas en mesure d'expliquer les mécanismes derrière ces résultats.

Considérant le peu d'études portant sur l'effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi, il est difficile de tirer des conclusions sur son effet réel sur la maladie. D'ailleurs, certaines de ces expériences ont été jugées incomplètes dans leur manière d'aborder le problème (Powell et Swanton, 2008). En effet, le glyphosate pourrait agir de manière plus indirecte sur la fusariose de l'épi. Par exemple, il a été démontré que la croissance de jeunes plantules d'orge était inhibée par la présence d'un certain couvert de rhizomes de chiendent éliminé par une application de glyphosate. (Lynch et Penn, 1980; Penn et Lynch, 1981). Cet effet se faisait surtout sentir lorsque le sol était plus sec et riche en N, deux conditions favorables à la croissance de *F. culmorum*. De plus, la décomposition des rhizomes de chiendent entraînait le lessivage de substances allélopathiques qui affaiblissaient les plantules d'orge et les rendaient vulnérables aux attaques de *F. culmorum*. Une autre étude a aussi démontré que les mauvaises herbes ayant reçu du glyphosate étaient davantage colonisées par *Fusarium* spp., dont *F. avenaceum*, un des agents pathogènes responsables de la fusariose de l'épi (Lévesque et coll., 1987). Par contre, cela n'avait pas affecté la culture de maïs subséquente, dont la croissance avait même été stimulée par l'application précédente de glyphosate. Mentionnons également que le glyphosate, sans affecter les *Fusarium* spp. eux-mêmes, pourrait inhiber la croissance de champignons qui leur sont antagonistes et par conséquent, favoriser la croissance des agents pathogènes responsables de la fusariose de l'épi (Powell et Swanton, 2008). Il a d'ailleurs été observé que les interactions compétitives entre certaines espèces de champignons du sol variaient selon diverses concentrations de glyphosate (Wardle et Parkinson, 1992). Enfin, le glyphosate pourrait agir sur la fusariose de l'épi en se liant avec certains micro-éléments du sol associés aux mécanismes de défense des plantes, comme le manganèse, limitant ainsi leur disponibilité (Johal et Huber, 2009). L'effet potentiel du glyphosate sur cette maladie pourrait donc être dû non à un, mais à plusieurs mécanismes plutôt complexes qui méritent d'être approfondis davantage.

3. Hypothèses et objectifs

Dans ce contexte, quelques hypothèses ont été énoncées :

1. Le glyphosate, utilisé sur un précédent cultural de soya, augmente l'intensité de la fusariose de l'épi du blé et de l'orge en travail réduit du sol et en semis direct;
2. Le glyphosate, utilisé sur un précédent cultural de soya, est sans effet sur l'intensité de la fusariose de l'épi du blé et de l'orge en travail conventionnel du sol;
3. L'application de glyphosate sur un précédent cultural de soya entraîne une production plus abondante d'inoculum de *F. graminearum* en provenance des résidus de culture l'année suivante comparativement à l'application d'autres herbicides.
4. Il existe une relation positive entre la quantité d'inoculum de *F. graminearum* provenant des résidus de culture de la parcelle au moment de la période critique d'infection et le contenu en DON des grains de blé et d'orge;
5. Il existe une relation positive entre la quantité d'inoculum de *F. graminearum* provenant de l'air au-dessus de la parcelle au moment de la période critique d'infection et le contenu en DON des grains de blé et d'orge.

L'objectif général de ce projet est de déterminer l'effet du glyphosate sur l'intensité de la fusariose de l'épi chez le blé et l'orge sous les conditions de culture du Québec. Plus précisément, ce projet a pour objectifs spécifiques de :

1. Déterminer l'effet du glyphosate, utilisé sur un précédent cultural de soya, sur l'intensité de la fusariose de l'épi du blé et de l'orge en travail conventionnel, en travail réduit du sol et en semis direct;
2. Évaluer l'effet du glyphosate, utilisé sur un précédent cultural de soya, sur la production d'inoculum de *F. graminearum* en provenance des résidus de culture;
3. Caractériser la quantité d'inoculum de *F. graminearum* en provenance des résidus de culture de la parcelle et de l'air au-dessus de la parcelle en travail conventionnel, en travail réduit du sol et en semis direct sous les conditions climatiques de deux régions du Québec.
4. Déterminer la distribution relative et la prédominance des différentes espèces de *Fusarium* associées à la fusariose de l'épi de deux régions du Québec caractérisées par différentes conditions environnementales.

4. Effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi chez le blé et l'orge selon différents travaux du sol

Marie-Eve Bérubé¹, Anne Vanasse¹, Sylvie Rioux², Nicole Bourget², Yves Dion³, Gilles Tremblay³

¹Département de phytologie, Université Laval, Québec, Québec, G1V 0A6, Canada;

²Centre de recherche sur les grains, Québec, Québec, G1P 3W8, Canada;

³Centre de recherche sur les grains, Saint-Mathieu-de-Beloeil, Québec, J3G 0E2, Canada

Résumé

La fusariose de l'épi est une maladie grave sous les conditions humides de l'Est canadien. Le travail du sol et l'application d'herbicides ont été reconnus pour influencer l'intensité de la maladie. Cette étude visait à déterminer l'effet du glyphosate sur le développement de la fusariose de l'épi chez le blé et l'orge et sur la production d'inoculum de *Fusarium graminearum* sous différents travaux du sol. L'expérience a été répétée sur deux années (2007-2008) à deux stations expérimentales situées au Québec, Canada. Six essais ont été implantés à chaque station, combinant deux céréales, blé et orge, et trois travaux du sol : labour à l'automne, travail réduit du sol au printemps et semis direct. Pour chaque essai, du glyphosate ou d'autres herbicides ont été appliqués sur du soya *Roundup Ready*TM l'année précédant la culture des céréales, constituant ainsi les parcelles principales. L'année suivante, trois cultivars de blé et d'orge ont été semés, constituant ainsi les sous-parcelles. L'indice de fusariose, la proportion de grains fusariés (FDK), le contenu en désoxynivalénol (DON) et la production d'inoculum par *F. graminearum* ont été mesurés. Le glyphosate n'a pas eu d'effet significatif sur l'indice de fusariose, le FDK ou le contenu en DON, quels que soient le travail du sol et la station. La production d'inoculum de *F. graminearum* a été augmentée par l'application de glyphosate dans un essai sur douze seulement. L'effet du cultivar était fortement significatif sur le contenu en DON. La relation entre l'inoculum de *F. graminearum* en provenance des résidus de soya et le contenu en DON était faible.

Effect of glyphosate on fusarium head blight in wheat and barley under different soil tillages

Marie-Eve Bérubé¹, Anne Vanasse¹, Sylvie Rioux², Nicole Bourget², Yves Dion³, Gilles Tremblay³

¹Département de phytologie, Université Laval, Québec, Québec, G1V 0A6, Canada;

²Centre de recherche sur les grains, Québec, Québec, G1P 3W8, Canada;

³Centre de recherche sur les grains, Saint-Mathieu-de-Beloeil, Québec, J3G 0E2, Canada

Abstract

Fusarium head blight (FHB) is a serious disease in the wet conditions of eastern Canada. Tillage practices and herbicide applications have been reported to influence the disease intensity. This study aimed to determine the effect of glyphosate on FHB development in wheat and barley and on *Fusarium graminearum* inoculum production under different soil tillages. The experiment was performed during two years (2007-2008) at two different sites in Quebec, Canada. Six trials were set in both sites, combining two cereal species, wheat and barley, and three soil tillages: mouldboard plough, spring tillage (minimum-till) and direct drilling. For each trial, glyphosate or other herbicides were applied on *Roundup Ready*TM soybean the year preceding cereal crops, constituting the main plots. The next year, three wheat and three barley cultivars were sown as subplots. FHB index, *Fusarium*-damaged kernels (FDK), deoxynivalenol (DON) content and *F. graminearum* inoculum production were measured. Glyphosate had no significant effect on FHB index, FDK or DON content, whatever the trial and the site. *F. graminearum* inoculum production was enhanced by glyphosate in only one trial out of twelve. Cultivar effect was highly significant on DON content. The relationship between *F. graminearum* inoculum from soybean residues and DON content was weak.

Introduction

Fusarium head blight (FHB) is a serious wheat and barley disease in eastern Canada (Bailey et al., 2004). *Fusarium graminearum* Schwabe (*Gibberella zeae* (Schwein.) Petch) is the principal pathogen responsible for FHB (Gilbert and Tekauz, 2000), although other species may contribute to the disease development in cooler climates, like *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc. (*Gibberella avenacea* R.J. Cook), *Fusarium poae* (Peck) Wollenw. and *Fusarium sporotrichioides* Sherb. (Bourdages et al., 2006). FHB can result in significant reduced yield and seed quality (McMullen et al., 1997). Moreover, this disease is associated with the production of deoxynivalenol (DON), a mycotoxin that makes the grain unfit for food or feed (Prelusky et al., 1994). *F. graminearum* produces spores on crop residues left on the soil surface constituting the primary source of inoculum. These debris serve for the overwintering and the development of the fungus, which leads to spores production (Shaner, 2003). *F. graminearum* is spread via windblown ascospores and macroconidia dispersed by splashing or wind-driven rain (Champeil et al., 2004a; Sutton, 1982). Ascospores may be dispersed on long distances (Maldonado-Ramirez et al., 2005). The development of FHB is favoured by frequent rainfalls, high humidity and warm temperatures that coincide with wheat flowering or barley heading (Bailey et al., 2004; Sutton, 1982). Because of that, this disease can be particularly devastating in areas characterized by wet weather such as eastern Canada.

Tillage practices are suspected to affect the incidence and the severity of the disease, as DON accumulation in grains. Some studies revealed that the incidence and severity of FHB and DON content are lower when residues are buried by ploughing, especially when the previous crop is a host species (Dill-Macky and Jones, 2000; Koch et al., 2006; Rioux et al., 2005; Schaafsma et al., 2005) and when weather conditions are favourable for FHB development (Champeil et al., 2004b; Koch et al., 2006). However, a lack of difference in FHB levels among minimum-till and no-till practices had been reported (Dill-Macky and Jones, 2000). According to this study, the density and layering of residue in no-till plots may have negatively influenced the microclimate and subsequent *F. graminearum* sporulation by reducing residue to soil contact. Moreover, in some studies, FHB was not

influenced by any tillage practice (Miller et al., 1998; Schaafsma et al., 2001). Other factors like previous crops (Schaafsma et al., 2001), weather conditions, susceptibility of cultivars and previous occurrence of FHB (Miller et al., 1998) may be more prevalent and overpass the effect of the tillage practice.

Nevertheless, other crop production factors potentially influencing the inoculum production of *Fusarium* spp. began to get some attention, like herbicides. Glyphosate (*Roundup*[™]) is a high-effective, non selective and systemic herbicide used against a broad spectrum of weeds (Franz, 1985). Few studies attempted to evaluate the direct effects of glyphosate on FHB and the results are often contradictory. One *in vitro* experiment demonstrated that glyphosate had not affected *F. graminearum* vegetative growth at concentrations equivalent to field rates of application (Jeffery and Burgess, 1990). Other *in vitro* studies showed that most of the glyphosate formulations tested increased *F. graminearum* and *F. avenaceum* growth, while herbicide concentration rarely had a significant effect on it (Hanson and Fernandez, 2002; 2003). In a field experiment held in Norway, glyphosate did not have any significant effect on *Fusarium* infection in harvested oat grains and did not interact with the tillage treatment (Henriksen and Elen, 2005). However, surveys conducted in eastern Saskatchewan revealed significant effects of glyphosate on FHB in wheat and barley under specific conditions. Wheat and barley fields where glyphosate had been previously applied under minimum-till were characterized by higher FHB index caused by *F. graminearum* and *F. avenaceum* (Fernandez et al., 2005; 2007).

Thus, it was necessary to further investigate the effects of glyphosate under different soil tillages on FHB in eastern Canada conditions where many growers use a *Roundup Ready*[™] soybean cultivar the year preceding the cereal crop. The objective of this project was to determine the effect of glyphosate, used on soybean as the previous crop, on FHB intensity in wheat and barley and on *F. graminearum* inoculum production coming from the residues under different soil tillages.

Materials and Methods

Description of sites and treatments

The field experiments were established in the province of Quebec, Canada, during two growing seasons (2007 and 2008) at two different sites. The first one was located at the Agronomy Research Station of Laval University, Saint-Augustin-de-Desmaures (46°45'N, 71°27'W), and the other one at the Centre de recherche sur les grains (CEROM), Saint-Mathieu-de-Beloeil (45°34'N, 73°12'W). Six trials were set in both sites, combining two cereal species, wheat and barley, and three soil tillages: mouldboard plough (MP), spring tillage (ST) and direct drilling (DD). At Saint-Augustin-de-Desmaures, three different loams of the Tilly series (Haplorthod) were used during this study. ST and DD trials were established in a soil with 49.2% sand, 38.2% silt, 12.6% clay, 4.1% organic matter and pH 6.0 in 2007 and in a soil with 30.2% sand, 45.1% silt, 24.7% clay, 4.0% organic matter and pH 6.2 in 2008, while MP trials were implanted in a soil with 39.8% sand, 44.1% silt, 16.1% clay, 3.5% organic matter and pH 6.4 for both years. At Saint-Mathieu-de-Beloeil, two heavy clays of the Saint-Urbain series (Humaquept) were used during this study. All trials were established in a soil with 10.9% sand, 19.0% silt, 70.0% clay, 6.9% organic matter and pH 6.1 in 2007 and in a soil with 5.2% sand, 23.0% silt, 71.9% clay, 3.5% organic matter and pH 6.9 in 2008. For each trial, a factorial experiment was implanted using a split-plot design with two herbicide treatments (glyphosate and no glyphosate) as main plots and three cultivar treatments (different susceptibility levels to FHB) as subplots. The six treatments (two herbicide treatments × three cultivar treatments) were replicated four times, resulting in 24 plots per trial and 144 plots per site.

One year before the implantation of the cereal field trials (2006 and 2007), glyphosate-resistant soybean (cv. Primo RR for Saint-Augustin-de-Desmaures and cv. 2702RR for Saint-Mathieu-de-Beloeil) were seeded in whole mouldboard ploughed fields at a row spacing of 36 cm in order to obtain 500 000 to 550 000 plants ha⁻¹. The preceding crop was corn except for the wheat-MP and barley-MP trials at Saint-Augustin-de-Desmaures in 2007 where the preceding crop was barley. Sowing dates at Saint-Augustin-de-Desmaures

were May 26th 2006 and May 25th 2007 and these at Saint-Mathieu-de-Beloeil were June 19th 2006 and June 12th 2007. Prior to sowing, phosphorus and potassium were applied according to soil analysis and fertilizers recommendations (CRAAQ, 2003) and incorporated using a field cultivator, while no nitrogen was applied since the crop was a pulse. Herbicide treatments for each year and site are described in Table 1. The other herbicides used in the “no glyphosate” treatment were chosen regarding the weed species to control in the field. Applications were made approximately one month after soybean sowing on wide strips in order to delimitate main plots of 6 m × 6 m (36 m²) at Saint-Augustin-de-Desmaures and 9 m × 6 m (54 m²) at Saint-Mathieu-de-Beloeil. Harvesting dates of the main plots were October 20th 2006, and October 16th and 17th 2007 at Saint-Augustin-de-Desmaures and November 6th 2006 and November 8th 2007 at Saint-Mathieu-de-Beloeil. All the crop residues were mowed and left on the plot surface.

Soil tillages were implanted after the soybean harvest. For both sites, MP consisted of a fall mouldboard ploughing with two passes of a field cultivator in the spring. ST consisted of one pass of a disk harrow with two passes of a field cultivator in the spring. DD had no tillage performed, except the use of a no-till drill for the sowing. The objective of these three different soil tillages was to product different amounts of soybean residues on soil surface which constitute the primary source of *Fusarium* inoculum the following season. Crop residue covers were measured at spring, after sowing, using a rope with 25 knots spaced out 6 inches apart. Knots touching a residue were counted and this number was multiplied by 4 in order to obtain crop residue covers in percentage (CPVQ, 2000). These results are given in Table 1.

In the years following the soybean crops (2007 and 2008), three wheat and three barley cultivars with distinct susceptibility levels to FHB were sowed at 450 seeds m⁻² for wheat and 375 seeds m⁻² for barley with a row spacing of 18 cm, constituting the subplots. The dimensions were 2 m × 6 m (12 m²) at Saint-Augustin-de-Desmaures and 3 m × 6 m (18 m²) at Saint-Mathieu-de-Beloeil. Wheat and barley of the MP and ST trials were planted using a conventional drill, and the DD trials, a no-till drill. The wheat cultivars used were AC Barrie (weakly susceptible), Orleans (moderately susceptible) and SS Fundy (highly susceptible), while the barley cultivars used were Oceanik (moderately susceptible), Raquel

(highly susceptible) and Perseis (highly susceptible) (CEROM, 2007). Sowing dates are given in Table 1. Nitrogen fertilization was of 70 kg ha⁻¹ non fractioned for the two cereals. Phosphorus and potassium were applied according to soil analysis and fertilizers recommendations (CRAAQ, 2003). Annual broadleaved weeds were controlled with bromoxynil/MCPA (Buctril M, 280 g a.i ha⁻¹/280 g a.i ha⁻¹) applied at the three-leaf stage of the wheat and barley crops. Harvest dates for every year and site are shown in Table 1.

Disease measurements

In wheat trials, three weeks after the end of the flowering stage (Zadoks stage 69 – Zadoks et al., 1974), spikes were collected in two rows on a length of 0.5 m and put in a freezer. Infected spikelets were assessed visually on 30 spikes taken randomly from the samples collected in the field. FHB index (total number of infected spikelets / total number of spikelets × 100) was calculated.

Six and seven rows of the middle of each plot were harvested at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloeil, respectively. From each wheat plot, a subsample of 15 g was prepared using a seed divider. *Fusarium*-damaged kernels (FDK) was assessed visually on 300 kernels (number of infected kernels / total number of kernels × 100). FHB index and FDK were not measured in barley trials because symptoms are not as distinctive as in wheat and may be confused with other diseases.

For the DON content evaluation, another subsample of 300 g was prepared from every plot using a divider, including barley ones. The subsamples were grounded and DON content was evaluated using an enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) (Veratox DON 5/5 and DON high sensitivity (HS), Neogen corporation, Lansing, MI).

***F. graminearum* inoculum sampling**

In the middle of each main plot (glyphosate and no glyphosate), two wooden stakes with metal supports were placed 2 meters apart approximately. On each of them, one Petri plate containing PCNB (pentachloronitrobenzene – Papavizas, 1967) agar medium was placed. Petri plates were facing the ground in order to capture *Fusarium* spp. spores, but also viable

propagules emerging from the soybean residues during the critical period of infection of wheat and barley. The Petri plate height was set at the ear base. This sampling method is based on the one described in Schmale III et al. (2005). Critical periods of infection were defined as 5 days before and after Zadoks stage 59 (heading completed) for barley and Zadoks stage 65 (50% flowering completed) for wheat (Zadoks et al., 1974). Critical periods of wheat and barley happened almost simultaneously for each year and site. These periods corresponded to July 1st to July 11th 2007 and July 4th to July 14th 2008 at Saint-Augustin-de-Desmaures and to July 10th to July 20th 2007 and July 5th to July 15th 2008 at Saint-Mathieu-de-Beloeil. Every morning, Petri plates placed 24 hours ago in the field were replaced and put to incubation for 7 days, at room temperature ($\sim 20\text{-}22^{\circ}\text{C}$) in darkness. After the incubation time, “*Fusarium*-like” isolates were transferred to a rapid-identification medium agar (Fg medium, Quebact Laboratories Inc., Montreal, Canada). Colony-forming units (CFU) characterized by a raspberry-red coloration were identified as *F. graminearum*. Identification was completed by microscopic observations based on the descriptions of Nelson et al. (1983).

Statistical analysis

For each trial and site, combined data of 2007 and 2008 were subjected to an analysis of variance using PROC MIXED of SAS. Herbicide treatments, cultivars and years were considered as fixed effects, while replicates within site were random effects. When an interaction between year and herbicide treatments or cultivars used occurred, statistical analysis was made for each year. In order to fulfil the assumptions of homogeneity of variance and normality of distribution, logarithmic ($\log_e x$) and square root (\sqrt{x}) transformations were executed on several trials data, which are indicated directly in tables. Significance was accepted or rejected using protected Fisher LSD at $P \leq 0.05$. Depending on the trial, raw or detransformed data are shown. Regression coefficients of the relationship between *F. graminearum* inoculum and DON content in wheat and barley were calculated using replicates and cultivar treatments means of herbicide treatments (2) coming from every soil tillage trial (3), site (2) and year (2). Consequently, for each species, 24 pairs of comparison were included in the calculation of the regression coefficients.

Results

Weather

The monthly temperatures and precipitations measured at the meteorological station located on each experimental site are presented for 2007 and 2008 growing seasons (Table 2). Saint-Augustin-de-Desmaures was characterized by rainfall below normal at the beginning of the growing season, followed by high precipitations in June and July for both years. At Saint-Mathieu-de-Beloil, rainfall was almost always below normal, except for July 2008 where precipitations were above normal. Saint-Augustin-de-Desmaures was the coolest site and temperatures were near normal in each year and site.

FHB index and FDK

Herbicide treatment had no significant effect on FHB index, whatever the site or the soil tillage trial (Table 3). However, FDK was affected by the herbicide treatment in the MP trial of Saint-Mathieu-de-Beloil ($P = 0.037$). Plots that received glyphosate had 2.6% less FDK than plots that received other herbicides (Table 3). There was no interaction between the herbicide treatment and the sampling year for both variables. Although sites were not compared statistically, FHB index and FDK results at Saint-Augustin-de-Desmaures were numerically lower than those at Saint-Mathieu-de-Beloil (Table 3).

DON content and *F. graminearum* inoculum production

Whatever the site or the soil tillage trial, glyphosate application did not result in higher DON content compared to the other herbicides applied (Table 4). No interaction between the herbicide treatment and the sampling year was observed for DON content. Nevertheless, a significant interaction occurred between the herbicide treatment and the cultivar used in the barley-DD trial at Saint-Augustin-de-Desmaures ($P = 0.023$ – Table 5). Within this trial, DON content of the highly susceptible cultivar Raquel was significantly higher when glyphosate was applied compared to the other herbicides. However, the other

highly susceptible cultivar, Perseis, and the moderately susceptible cultivar, Oceanik, were not affected by the herbicide treatments (Table 5).

Since an interaction between the cultivar used and the sampling year happened in almost all trials, statistical analysis of the cultivar effect was made for each year. Except for two trials (wheat-DD 2007 and barley-DD 2008 at Saint-Augustin-de-Desmaures), cultivar effect was highly significant. Generally, AC Barrie was the least affected wheat cultivar and SS Fundy was the most affected one. In the barley trials, Oceanik was the least susceptible cultivar whereas Perseis was the most susceptible one (Table 6). The highest DON contents were obtained in wheat at Saint-Mathieu-de-Beloil, and the lowest, in barley at Saint-Augustin-de-Desmaures. Overall, Saint-Augustin-de-Desmaures results were numerically lower than those of Saint-Mathieu-de-Beloil (Tables 4 and 6).

Looking at *F. graminearum* inoculum production, herbicide treatment had a significant effect in wheat-ST ($P = 0.035$) and barley-DD ($P = 0.036$) trials at Saint-Mathieu-de-Beloil and did not interact with the sampling year (Table 7). In wheat-ST trial, daily mean number of *F. graminearum* CFU was higher when other herbicides were applied, while glyphosate application was responsible of higher inoculum production in barley-DD trial (Table 7). Interactions between herbicide treatments and sampling years were detected regarding this variable in wheat-MP and wheat-DD trials at Saint-Augustin-de-Desmaures (Table 8). In both trials, herbicide effect was not significant in 2007. However, in wheat-MP trial, other herbicides application caused a significantly higher *F. graminearum* inoculum production in 2008 ($P = 0.045$). Despite the presence of an interaction between years, there was no significant effect of the herbicide treatments in wheat-DD trial in 2008. Still, other herbicides application tended to give a higher result in 2008 compared to glyphosate application (Table 8).

Relationship between *F. graminearum* inoculum and DON content

The relationship between *F. graminearum* inoculum coming from crop residues and DON content in wheat and barley grains was calculated (Fig. 2). Both regression coefficients were significant, although P value for barley was higher (wheat: $P = 0.004$;

barley: $P = 0.014$). However, these relationships were rather weak for both cereal species (wheat: $R^2 = 0.321$; barley: $R^2 = 0.247$). The smallest DON content values represented in each graph (less than 1 ppm) seemed to distort the interpretation of the relationship (Fig. 2). In fact, when these results were removed from the regression analysis, both relationships were no longer significant with extremely low regression coefficients (wheat: $P = 0.667$, $R^2 = 0.011$; barley: $P = 0.297$, $R^2 = 0.068$). There is a high variability among years and sites observed in this study. However, no strong relationships really occurred when statistical analyses were made separating years and sites.

Discussion

The herbicide treatments had no impact on FHB index and DON content, whatever the soil tillage and the site. There was a significant effect on FDK at Saint-Mathieu-de-Beloeil, but the higher FDK value was for the no glyphosate treatment and not the glyphosate one. Regarding *F. graminearum* inoculum production, 2 trials out of 12 were affected significantly by the herbicide treatments, glyphosate leading to more CFU in one of them. In one trial showing an herbicide-year interaction effect (wheat-MP trial at Saint-Augustin-de-Desmaures), there was also a significant effect of herbicide treatments on *F. graminearum* inoculum production in a 2008 trial. But once again, this was due to a higher daily mean number of *F. graminearum* CFU collected from the no glyphosate plots.

These results are in concordance with those of Henriksen and Elen (2005), who found that a fall application of glyphosate was not responsible of a higher proportion of *Fusarium* infected grains the next year in Norway. However, our conclusions are against those of Fernandez et al. (2005; 2007), who said that glyphosate application within 18 months before wheat or barley crops and under minimum-till was responsible of more FHB in Saskatchewan.

The lack of glyphosate effect on FHB in our experiments may be explained by the absence of glyphosate on soybean residues in the hypothesis that glyphosate can also enhance *F. graminearum* sporulation as it can for its vegetative growth (Hanson and Fernandez, 2002; 2003). It has been proven that straw of cereals that received glyphosate in preharvest

could contain herbicide residues levels up to 60 ppm (Gilbert et al., 2006). However, a study in Argentina showed that *Roundup Ready*TM soybean plants treated with glyphosate contained less than 6 ppm of glyphosate and its metabolites at harvest, several months after treatment, with the highest quantities obtained after two applications of the herbicide (Arregui et al., 2003). Since only one glyphosate application was done in our experiment, we can suppose that glyphosate concentration was very low in crop residues. Rainfall could also cause leaching of the herbicide out of the desiccated residues left on the ground after harvest (Cessna and Waddington, 1995). This phenomenon may have happened in our experiment. Soybean residues were mowed after harvest in order to simulate the use of a commercial combine and this operation may have greatly exposed glyphosate contained in it to leaching by rain and snow. Total precipitations received by year are 1000 mm in Saint-Mathieu-de-Beloeil area and 1231 mm in Saint-Augustin-de-Desmaures area. This is at least two times more precipitations than the 451 mm received in Yorkton, Saskatchewan, the area where Fernandez's surveys were conducted (Canada's National Climate Archive, 2008). Therefore, it is likely that glyphosate was not present anymore on soybean residues the next growing season. This could partially explain why the herbicide did not have any effect on the production of *F. graminearum* inoculum in our experiments and consequently on FHB development.

Moreover, the weak relationships calculated between *F. graminearum* inoculum production from crop residues and DON content in wheat and barley grains demonstrated that *F. graminearum* inoculum coming from soybean residues was not the only factor involved in FHB development. Thus, even if glyphosate would have enhanced *F. graminearum* vegetative growth (Hanson and Fernandez, 2002; 2003) and further inoculum production, the other factors involved in FHB development may have hidden the glyphosate effect.

The lack of response of FHB to tillage practices was also reported many times in the literature (Miller et al., 1998; Schaafsma et al., 2001; Teich and Nelson, 1984). It has been shown that the susceptibility of the previous crop to FHB played a more important role in the development of the disease. In our study, *Roundup Ready*TM soybean had been sown the year before wheat and barley crops because this is a practice commonly used by growers. Even if soybean can support growth of *F. graminearum* (Baird et al., 1997), host crop

residues are still more colonized (Dill-Macky and Jones, 2000; Miller et al., 1998). Besides, it has been reported that tillage practices had no effect on FHB if the precedent crop was soybean compared to corn or wheat (Dill-Macky and Jones, 2000; Teich and Nelson, 1984).

Other well-known factors had a greater influence on FHB in this study. Cultivar susceptibility was highly associated with DON production in wheat and barley grains. These results followed the FHB resistance levels known for each cultivar (CEROM, 2007). This was proven many other times (Fernandez et al., 2005; Koch et al., 2006; Schaafsma et al., 2001). Finally, the importance of climatic conditions during the critical period of infection could not be avoided. Disease measurements were numerically higher at Saint-Mathieu-de-Beloeil compared to Saint-Augustin-de-Desmaures, which can be explained by higher temperatures prevailing there during the critical period, combined with humid conditions. This effect is well reported in the literature (Sutton, 1982; Tekauz et al., 2000).

In conclusion, it seems that glyphosate has no real impact on development of FHB and on *F. graminearum* inoculum production coming from soybean residues under eastern Canada conditions, whatever the site, the cereal species or the crop residue cover. High precipitations occurring in this part of the country may partially explain the lack of response of FHB to glyphosate by leaching the glyphosate out of residues. Cultivar susceptibility and climatic conditions appear to have a greater effect on FHB intensity.

Acknowledgments

This work was supported by the ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec and by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada. They are gratefully acknowledged. We would also like to thank Martin Tremblay, Francis Gagnon, Denis Marois, Martin Lacroix and Marco Bussièrès for technical assistance. Thanks to Annie Brégaré for helping in the statistical analysis. Finally, special thanks are addressed to all the persons who helped out with the *Fusarium* data.

Literature Cited

- Arregui, M.C., Lenardón, A., Sanchez, D., Maitre, M.I., Scotta, R. and Enrique, S. 2003. Monitoring glyphosate residues in transgenic glyphosate-resistant soybean. *Pest Manag. Sci.* 60: 163-166.
- Bailey, K.L., Couture, L., Gossen, B.D., Gugel, R.K. and 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. and Lang, M.L. 1997. Diversity and longevity of the soybean debris mycobiota in a no-tillage system. *Plant Dis.* 81: 530-534.
- Bourdages, J.V., Marchand, S., Rioux, S. and Belzile, F.J. 2006. Diversity and prevalence of *Fusarium* species from Quebec barley fields. *Can. J. Plant Pathol.* 28: 419-425.
- Canada's National Climate Archive. 2008. Canadian Climate Normals or Averages 1971-2000 [online]. Environment Canada. Available at http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals/index_e.html [cited January 14th, 2010].
- Centre de recherche sur les grains (CEROM). 2007. Résultats des essais de maïs-grain et de cultivars de plantes oléoprotéagineuses 2006 et recommandations de cultivars de céréales 2007. Saint-Bruno-de-Montarville, QC. 63 p.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2003. Guide de référence en fertilisation. Sainte-Foy, QC. 294 p.
- Cessna, A.J. and Waddington, J. 1995. Dissipation of glyphosate and its metabolite AMPA in established crested wheatgrass following spring application. *Can. J. Plant Sci.* 75: 759-762.
- Champeil, A., Doré, T. and Fourbet, J.F. 2004a. *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 Sci.* 166: 1389-1415.
- Champeil, A., Fourbet, J.F., Doré, T. and Rossignol, L. 2004b. Influence of cropping system on fusarium head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Prot.* 23: 531-537.
- Conseil des productions végétales du Québec inc. (CPVQ). 2000. Impacts sur la couverture de résidus. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures, Feuillet 2-E. 8 p.
- Dill-Macky, R. and Jones, R.K. 2000. The effect of previous crop residues and tillage on fusarium head blight of wheat. *Plant Dis.* 84: 71-76.

Fernandez, M.R., Selles, F., Gehl, D., DePauw, R.M. and Zentner, R.P. 2005. Crop production factors associated with fusarium head blight in spring wheat in eastern Saskatchewan. *Crop Sci.* 45: 1908-1916.

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

Franz, J.E. 1985. Discovery, development and chemistry of glyphosate. *In* The herbicide glyphosate. *Directed by* E. Grossbard et D. Atkinson. Butterworths, London UK. p. 3-17.

Gilbert, G., Bernier, D. and Lacroix, C. 2006. Un vieux problème chez le fraisier enfin solutionné! [online]. Laboratoire de diagnostic en phytoprotection, MAPAQ. Available at <http://www.agrireseau.qc.ca/references/13/Un%20vieux%20probl%a8me%20de%20fraisier.pdf> [cited January 14th, 2010].

Gilbert, J. and Tekauz, A. 2000. Review: Recent developments in research on fusarium head blight of wheat in Canada. *Can. J. Plant Pathol.* 22: 1-8.

Hanson, K.G. and Fernandez, M.R. 2002. In-vitro growth of fusarium head blight fungi as affected by glyphosate-based herbicides. *Can. J. Plant Pathol.* 24: 387 (abstract).

Hanson, K.G. and Fernandez, M.R. 2003. Glyphosate herbicides affect plant pathogenic fungi. *Can. J. Plant Pathol.* 25: 120 (abstract).

Henriksen, B. and Elen, O. 2005. Natural *Fusarium* grain infection level in wheat, barley and oat after early application of fungicides and herbicides. *J. Phytopathol.* 153: 214-220.

Jeffery, S. and Burgess, L.W. 1990. Growth of *Fusarium graminearum* Schwabe Group 1 on media amended with atrazine, chlorsulfuron or glyphosate in relation to temperature and osmotic potential. *Soil Biol. Biochem.* 22: 665-670.

Koch, H.J., Pringas, C. and Maerlaender, B. 2006. Evaluation of environmental and management effects on fusarium head blight infection and deoxynivalenol concentration in the grain of winter wheat. *Eur. J. Agron.* 24: 357-366.

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

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

Miller, J.D., Culley, J., Fraser, K., Hubbard, S., Meloche, F., Ouellet, T., Seaman, W.L., Seifert, K.A., Turkington, K. and Voldeng, H. 1998. Effect of tillage practice on fusarium head blight of wheat. *Can. J. Plant Pathol.* 20: 95-103.

- Nelson, P.E., Toussoun, T.A., and Marasas, W.F.O. 1983. *Fusarium* species: An illustrated manual for identification. Pennsylvania State University Press, University Park. 193 p.
- Papavizas, G.C. 1967. Evaluation of various media and antimicrobial agents for isolation of *Fusarium* from soil. *Phytopathology* 57: 848-852.
- Prelusky, D.B., Rotter, B.A. and Rotter, R.G. 1994. Toxicology of mycotoxins. In *Mycotoxins in grain: Compounds other than aflatoxin. Directed by J.D. Miller et H.L. Trenholm.* Eagan Press, St.Paul. p. 359-404.
- Rioux, S., Pageau, D., Lajeunesse, J., Lafond, J. and 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.*
- Schaafsma, A.W., Tamburic-Ilincic, L. and 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. *Can. J. Plant Pathol.* 27: 217-224.
- Schaafsma, A.W., Tamburic-Ilincic, L., Miller, J.D. and Hooker, D.C. 2001. Agronomic considerations for reducing deoxynivalenol in wheat grain. *Can. J. Plant Pathol.* 23: 279-285.
- Shaner, G. 2003. Epidemiology of fusarium head blight of small grain cereals in North America. In *Fusarium head blight of wheat and barley. Directed by K.J. Leonard et W.R. Bushnell.* APS Press, St.Paul. p. 84-119.
- Sutton, J.C. 1982. Epidemiology of wheat head blight and maize ear rot caused by *Fusarium graminearum*. *Can. J. Plant Pathol.* 4: 195-209.
- Teich, A.H. and Nelson, K. 1984. Survey of fusarium head blight and possible effects of cultural practices in wheat fields in Lambton County in 1983. *Can. Plant Dis. Surv.* 64: 11-13.
- Tekauz, A., McCallum, B. and Gilbert, J. 2000. Review: Fusarium head blight of barley in western Canada. *Can. J. Plant Pathol.* 22: 9-16.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T. and Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.

Table 1. Crop residue cover, herbicides applied and cereals sowing and harvesting dates at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloil in 2007 and 2008.

Characteristics	Saint-Augustin-de-Desmaures		Saint-Mathieu-de-Beloil	
	2007	2008	2007	2008
Soybean				
Crop residue cover (%)	MP ^w : 2.1 ST: 39.5 DD: 79.6	MP: 2.3 ST: 35.8 DD: 81.5	MP: 2.5 ST: 12.2 DD: 38.7	MP: 0.7 ST: 14.2 DD: 30.6
Herbicides applied (g a.i. ha ⁻¹)	G ^x : glyphosate ^y (902) NG: bentazon (840)	G: glyphosate (902) NG: bentazon (840, ST; DD); fomesafen (240, MP)	G: glyphosate (902) NG: bentazon (840) + fenoxaprop-p-ethyl (54)	G : glyphosate (902) NG: thifensulfuron methyl (8) + quizalofop p-ethyl (48)
Cereals				
Sowing date	MP: May 7th ST; DD: May 8th	May 12th	MP; ST: May 23rd DD: May 25th	MP; ST: May 13th DD: May 11th
Harvesting date	W ^z : August 20th B: August 16th	W: August 25th B: August 18th	W: September 7th B: August 29th	W: August 20th B: August 14th

^w MP = mouldboard plough; ST = spring tillage; DD = direct drilling.

^x G = glyphosate; NG = no glyphosate.

^y glyphosate = Roundup WeatherMax; bentazon = Basagran; fomesafen = Reflex; fenoxaprop-p-ethyl = Excel; thifensulfuron methyl = Pinnacle; quizalofop p-ethyl = Assure.

^z W = wheat; B = barley.

Table 2. Monthly temperatures and precipitations for each site in 2007 and 2008 and average of the last 30 years in Quebec.

	Saint-Augustin-de-Desmaures			Saint-Mathieu-de-Beloeil		
	2007 ¹	2008 ¹	30 years avg. ²	2007 ³	2008 ³	30 years avg. ⁴
<u>Temperature (°C)</u>						
May	12.0	10.6	11.4	14.1	12.3	13.4
June	17.2	16.4	16.4	19.6	19.6	18.3
July	18.7	19.4	19.5	19.9	21.2	20.4
August	17.3	17.6	18.0	19.3	19.2	19.3
Mean	16.3	16.0	16.3	18.2	18.1	17.9
<u>Rainfall (mm)</u>						
May	63	25	108	55	32	81
June	77	201	112	63	68	92
July	186	128	120	69	116	99
August	130	105	111	87	101	93
Total	457	459	451	273	317	365

¹ Weather data from the meteorological station located on Saint-Augustin-de-Desmaures site.

² Weather data from the Environment Canada meteorological station located at Saint-Augustin, Quebec.

³ Weather data from the meteorological station located on Saint-Mathieu-de-Beloeil site.

⁴ Weather data from the Environment Canada meteorological station located at Sainte-Madeleine, Quebec.

Table 3. FHB index and FDK regarding the herbicide applied on the soybean previous crop for three soil tillages in wheat at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloil (means of 2007 and 2008).

	Saint-Augustin-de-Desmaures			Saint-Mathieu-de-Beloil		
	MP ¹	ST	DD	MP	ST	DD
FHB^u index (%)						
G ^v	3.1 a ^w	6.4 a ^x	3.5 a ^y	12.1 a	8.3 a	6.7 a ^y
NG	2.9 a	6.3 a ^x	3.6 a ^y	12.1 a	8.1 a	6.2 a ^y
FDK^z (%)						
G	6.7 a ^x	8.5 a	7.3 a	15.0 b ^y	16.6 a	10.1 a ^y
NG	8.0 a ^x	8.2 a	8.7 a	17.6 a ^y	16.0 a	10.7 a ^y

¹MP = mouldboard plough; ST = spring tillage; DD = direct drilling.

^uFHB = fusarium head blight.

^vG = glyphosate; NG = no glyphosate.

^wFor each variable, means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ within each column.

^x \sqrt{x} detransformed means.

^y $\ln x$ detransformed means.

^zFDK = *Fusarium*-damaged kernels.

Table 4. DON content regarding the herbicide applied on the soybean previous crop for three soil tillages in wheat and barley at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloil (means of 2007 and 2008).

	Saint-Augustin-de-Desmaures			Saint-Mathieu-de-Beloil		
	MP ^y	ST	DD	MP	ST	DD
	DON content (ppm)					
<u>Wheat</u>						
G ^w	2.2 a ^x	1.5 a ^y	2.4 a	9.0 a	8.3 a	6.2 a
NG	2.4 a	1.6 a ^y	2.6 a	9.1 a	8.1 a	6.5 a
<u>Barley</u>						
G	0.8 a	0.9 a	Int. ^z	5.2 a ^y	4.1 a	3.2 a
NG	1.0 a	0.6 a	Int.	5.2 a ^y	5.4 a	3.3 a

^y MP = mouldboard plough; ST = spring tillage; DD = direct drilling.

^w G = glyphosate; NG = no glyphosate.

^x For each cereal, means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ within each column.

^y \sqrt{x} detransformed means.

^z Int. = Interaction between herbicide treatment and cultivar treatment.

Table 5. DON content regarding the interaction between the herbicide applied and the cultivar used in barley/direct drilling trial at Saint-Augustin-de-Desmaures (means of 2007 and 2008).

	Oceanik	Raquel	Perseis
	DON content (ppm)		
<u>Barley/DD^w</u>			
G ^x	0.36 b ^{yz}	0.65 a ^z	0.46 ab ^z
NG	0.48 ab ^z	0.36 b ^z	0.53 ab ^z

^w DD = direct drilling.

^x G = glyphosate; NG = no glyphosate.

^y Means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$.

^z ln x detransformed means.

Table 6. DON content regarding the cultivar used for three soil tillages in wheat and barley at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloil in 2007 and 2008.

	Saint-Augustin-de-Desmaures			Saint-Mathieu-de-Beloil		
	MP ^x	ST	DD	MP	ST	DD
DON content (ppm)						
<u>Wheat/2007</u>						
AC Barrie	0.11 b ^{yz}	0.18 c ^z	0.06 a ^z	7.7 b	6.3 b	3.0 c
Orleans	0.14 b ^z	0.25 b ^z	0.06 a ^z	8.4 b	7.0 b	3.7 b
SS Fundy	0.58 a ^z	0.71 a ^z	0.12 a ^z	13.4 a	10.8 a	7.9 a
<u>Wheat/2008</u>						
AC Barrie	2.8 c	2.9 b	3.3 b	5.2 b	5.5 b	5.2 b ^z
Orleans	5.4 a	5.0 a	4.3 b	5.5 b	6.6 b	5.6 b ^z
SS Fundy	4.6 b	3.2 b	7.1 a	13.6 a	12.9 a	12.6 a ^z
<u>Barley/2007</u>						
Oceanik	0.13 b ^z	0.13 b	0.13 b	7.5 b	3.6 c	1.6 c
Raquel	0.23 a ^z	0.20 a	0.20 a	10.5 a	6.6 b	4.6 b
Perseis	0.25 a ^z	0.22 a	0.21 a	11.9 a	8.7 a	5.5 a
<u>Barley/2008</u>						
Oceanik	0.9 c ^z	0.8 b	1.3 a ^z	1.6 c	2.3 c	1.6 c
Raquel	1.4 b ^z	1.0 b	1.2 a ^z	2.2 b	3.4 b	3.0 b
Perseis	2.3 a ^z	2.1 a	1.2 a ^z	2.6 a	4.0 a	3.4 a

^x MP = mouldboard plough; ST = spring tillage; DD = direct drilling.

^y For each cereal-year combination, means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ within each column.

^z ln x detransformed means.

Table 7. Daily mean number of *F. graminearum* colony-forming units (CFU) coming from crop residues during the critical period of infection regarding herbicide effect for three soil tillages in wheat and barley at Saint-Augustin-de-Desmaures and Saint-Mathieu-de-Beloil (means of 2007 and 2008).

	Saint-Augustin-de-Desmaures			Saint-Mathieu-de-Beloil		
	MP ^y	ST	DD	MP	ST	DD
	CFU d ⁻¹					
<u>Wheat</u>						
G ^w	Int. ^x	0.53 a ^y	Int. ^x	1.63 a	1.08 b	1.11 a
NG	Int.	0.43 a	Int.	1.61 a	1.44 a	0.97 a
<u>Barley</u>						
G	0.70 a ^z	0.44 a ^z	0.37 a	1.22 a	0.57 a	0.85 a
NG	0.96 a ^z	0.44 a ^z	0.26 a	1.00 a	0.91 a	0.68 b

^y MP = mouldboard plough; ST = spring tillage; DD = direct drilling.

^w G = glyphosate; NG = no glyphosate.

^x Int. = Interaction between herbicide treatment and year.

^y For each cereal, means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ within each column.

^z \sqrt{x} detransformed means.

Table 8. Daily mean number of *F. graminearum* colony-forming units (CFU) coming from crop residues during the critical period of infection regarding the interaction between the herbicide applied and the sampling year in wheat/mouldboard plough and wheat/direct drilling trials at Saint-Augustin-de-Desmaures.

	MP ^w		DD	
	2007	2008	2007	2008
	CFU d ⁻¹			
<u>Wheat</u>				
G ^x	0.23 a ^{yz}	1.69 b	0.15 a	0.77 a
NG	0.21 a ^z	2.22 a	0.14 a	1.84 a

^w MP = mouldboard plough; DD = direct drilling.

^x G = glyphosate; NG = no glyphosate.

^y Means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ within each column.

^z ln x detransformed means.

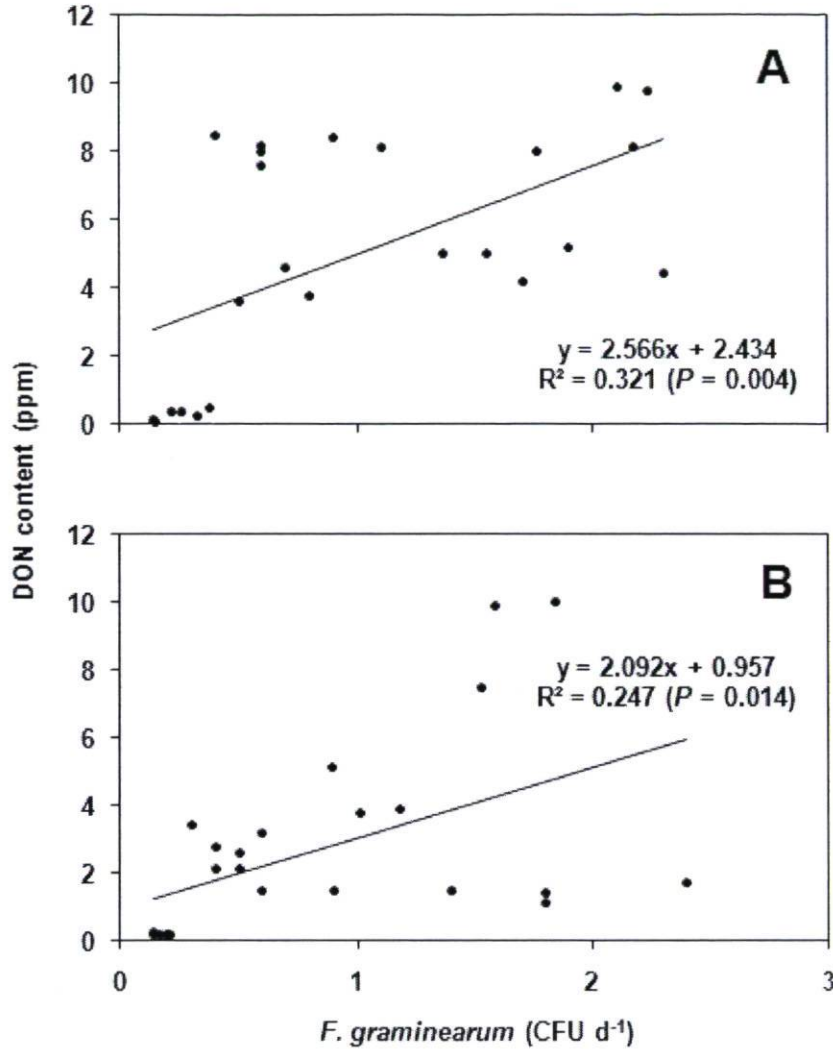


Figure 2. Relationship between the daily mean number of *F. graminearum* colony-forming units (CFU) coming from crop residues during the critical period of infection and DON content. (A, wheat grains; B, barley grains. For each species, 24 pairs of comparison are included in the regression: two pairs of comparison (G-cultivar mean and NG-cultivar mean) of every soil tillage trial (3), site (2) and year (2).)

5. Caractérisation de la quantité d'inoculum de *Fusarium graminearum* en provenance des résidus et de l'air selon différentes conditions culturales et climatiques

5.1 Introduction

La provenance de l'inoculum de *F. graminearum* d'un champ affecté par la fusariose de l'épi a été discutée à plusieurs reprises dans la littérature. L'inoculum de *F. graminearum* susceptible d'infecter les cultures est majoritairement formé de macroconidies et d'ascospores. Les macroconidies pluviales ne sont transportées que sur de très courtes distances à partir de la source d'inoculum (Fernando et coll., 1997), alors que les ascospores plus légères peuvent être transportées par les masses d'air et le vent (Doohan et coll., 2003; Sutton, 1982), contribuant ainsi à l'inoculum aérien (Fernando et coll., 1997). Il existe toutefois beaucoup de controverse concernant la distance réelle parcourue par les ascospores anémophiles. Certains supposent que les ascospores ne seraient pas transportées suffisamment loin pour sortir de l'enceinte du champ (Fernando et coll., 1997). L'inoculum produit à l'intérieur des limites d'un champ donné aurait un rôle prédominant dans l'infection de ce champ, particulièrement lorsque les résidus de culture présents permettent la conservation de *F. graminearum* (Francl et coll., 1999). Cependant, d'autres mentionnent que l'inoculum aérien serait en fait formé d'un mélange d'ascospores en provenance du champ infecté et d'autres champs environnants (Del Ponte et coll., 2003; Schmale III et coll., 2005). Des ascospores viables se retrouveraient en quantité élevée de 50 m à 1 km au-dessus du sol, leur permettant ainsi d'être transportées sur de grandes distances (Maldonado-Ramirez et coll., 2005). En effet, des spores ont déjà été retrouvées à plusieurs kilomètres de zones qui étaient affectées par la fusariose (Francl et coll., 1999). Il semblerait donc probable que les rotations de culture effectuées autant à l'échelle du champ que de la région pourraient influencer la production d'inoculum aérien susceptible de provoquer l'infection des céréales par la fusariose de l'épi (Del Ponte et coll., 2003).

La quantité d'inoculum de *F. graminearum* dans l'air au-dessus d'un champ d'une culture hôte varie également selon les conditions climatiques. Ces dernières influencent d'abord l'initiation de la production de l'inoculum en provenance des résidus. Les températures doivent être chaudes et humides pour favoriser le développement de l'inoculum (Sutton, 1982). La production d'ascospores augmente sous des températures allant de 13 à 33 °C, avec un optimum entre 25 et 28 °C, alors que la production de macroconidies est plus élevée lorsque les températures se retrouvent entre 16 et 36 °C et optimale entre 28 et 32 °C (Doohan et coll., 2003; Sutton, 1982). Quant à l'humidité relative, plus elle est élevée, plus la production d'ascospores et de macroconidies est forte (Sutton, 1982; Xu, 2003).

Les conditions climatiques ont aussi un rôle à jouer dans le relâchement de l'inoculum. Par contre, elles ne sont pas les mêmes pour les ascospores et les macroconidies. Le relâchement d'ascospores est généralement plus élevé d'un à quatre jours après un épisode de pluie de plus de 5 mm (Fernando et coll., 2000; Inch et coll., 2005; Paulitz, 1996). En revanche, il est considérablement réduit les journées où l'humidité relative excède 80 % ou lorsqu'il tombe plus de 5 mm de pluie (Paulitz, 1996). La température joue également un rôle important; le relâchement des ascospores est favorisé entre 11 et 23 °C (Sutton, 1982). Quant aux macroconidies, les quantités retrouvées dans l'air sont nulles ou faibles avant un épisode de pluie, mais augmentent graduellement avec la pluie pour atteindre un pic quelques heures après la pluie, alors que l'humidité relative est élevée. Cependant, l'effet des températures est négligeable (Rossi et coll., 2002).

Toutefois, malgré la présence d'inoculum de *F. graminearum* dans un champ, celle-ci ne semble pas toujours parfaitement reliée à certaines variables associées au développement de la maladie, comme le contenu en DON (Schlang et coll., 2008). En effet, *F. graminearum* infecte davantage les cultures lorsque les températures se situent entre 20 et 30 °C et que les épis sont en présence d'humidité pour une période de 48 à 60 heures (Sutton, 1982). Ainsi, la présence d'inoculum de *F. graminearum* dans l'air doit coïncider avec ces conditions environnementales pour que l'infection puisse avoir lieu.

Dans le cadre de ce projet, un volet exploratoire a permis de caractériser la quantité d'inoculum de *F. graminearum* en provenance des résidus de culture de parcelles de blé et

d'orge, de même que de l'air au-dessus de celles-ci, soumises à trois travaux du sol sous les conditions climatiques de deux différentes régions du Québec.

5.2 Matériel et méthodes

5.2.1 Mise en place des essais

L'expérience a été répétée sur deux années (2007-2008) à deux stations expérimentales de la province de Québec, soit à la Station agronomique de l'Université Laval à Saint-Augustin-de-Desmaures et au Centre de recherche sur les grains (CÉROM) de Saint-Mathieu-de-Beloeil. Sur un précédent cultural de soya, six essais ont été implantés, combinant deux céréales, blé et orge, et trois travaux du sol : travail conventionnel, travail réduit du sol et semis direct. Les travaux du sol ont été exécutés après la récolte du soya. Le travail conventionnel consistait en un labour d'automne suivi de deux passages de vibroculteur au printemps. Le travail réduit consistait en un passage de herse à disques suivi de deux passages de vibroculteur au printemps. Mis à part le passage du semoir semis direct, aucun travail du sol n'a été fait pour le semis direct. L'objectif de ces différents travaux du sol était de produire différentes quantités de résidus de soya à la surface du sol, qui sont à l'origine de la principale source d'inoculum de *Fusarium* la saison suivante.

Des informations supplémentaires concernant la mise en place des essais sont disponibles à la section « Materials and Methods » du chapitre 4.

5.2.2 Prise de données

Pour ce volet, un bloc correspondait à une parcelle principale de l'expérience décrite au chapitre 4 (annexe A). Pour chacun des huit blocs (parcelles principales), trois boîtes de Pétri contenant un milieu de culture sélectif pour les *Fusarium* spp., à base de PCNB (pentachloronitrobenzène - Papavizas, 1967), ont été mises en place à l'aide de piquets de bois et de supports de métal. Deux de celles-ci étaient placées au centre du bloc, à environ 2 m l'une de l'autre. Elles étaient orientées vers le sol de manière à capter surtout les spores de *F. graminearum* produites et relâchées à partir des résidus de culture de soya de la

parcelle et susceptibles d'atteindre les épis de blé et d'orge. Ces boîtes de Pétri correspondaient au traitement bas. La hauteur de ces boîtes de Pétri était variable. Avant la sortie des épis, elle correspondait à la hauteur de la dernière feuille sortie, alors qu'à partir de l'épiaison, le point de repère pour son positionnement était la base de l'épi. L'autre boîte de Pétri correspondait au traitement haut. Elle était placée du côté ouest du bloc (vent dominant), en périphérie de celui-ci, mais à l'intérieur du pourtour ensemencé de l'essai (annexe A). Elle était orientée vers le ciel afin de capter surtout les spores de *F. graminearum* en provenance de l'air au-dessus de la parcelle. En 2007, la hauteur de cette boîte était fixée à environ 85 cm pour le blé et 80 cm pour l'orge pour toute la durée de l'échantillonnage. En 2008, afin de s'assurer que la boîte de Pétri (traitement haut) soit bien au-dessus des épis de la parcelle, la hauteur a été augmentée à 150 cm environ. De plus, pour chacun des six essais des deux stations en 2008, une boîte de Pétri supplémentaire a été placée complètement à l'extérieur de l'essai, du côté ouest et toujours à 150 cm de hauteur, de manière à capter et estimer l'inoculum en provenance de l'extérieur du champ.

En 2007, les premières boîtes de Pétri ont été placées le 15 juin, tôt en matinée, aux deux stations. En 2008, cet échantillonnage a débuté le 16 juin. Après un séjour d'environ 24 heures au champ, les boîtes de Pétri étaient remplacées par d'autres boîtes de Pétri. En 2007, l'échantillonnage a été effectué jusqu'au 13 juillet à Saint-Augustin-de-Desmaures et jusqu'au 23 juillet à Saint-Mathieu-de-Beloëil. En 2008, les boîtes de Pétri ont été placées jusqu'au 24 juillet à Saint-Augustin-de-Desmaures et jusqu'au 21 juillet à Saint-Mathieu-de-Beloëil. L'objectif était de couvrir la période critique d'infection du blé et de l'orge. Ces périodes correspondaient à 5 jours avant et après le stade Zadoks 59 (épiaison complétée) pour l'orge et à 5 jours avant et après le stade Zadoks 65 (50 % floraison complétée) pour le blé. Les périodes critiques d'infection du blé et de l'orge ont coïncidé aux deux stations. Elles allaient du 1^{er} au 11 juillet 2007 et du 4 au 14 juillet 2008 à Saint-Augustin-de-Desmaures et du 10 au 20 juillet 2007 et du 5 au 15 juillet 2008 à Saint-Mathieu-de-Beloëil.

Les boîtes de Pétri orientées vers le haut nécessitaient un traitement particulier lors des journées de pluie. Ce traitement a différé en 2007 et en 2008. En 2007, l'eau contenue par

les boîtes de Pétri orientées vers le haut était jetée directement au champ et les boîtes de Pétri étaient mises en incubation comme d'habitude. Par contre, en 2008, il a été décidé de recueillir l'eau de pluie des boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'extérieur des essais et d'en évaluer les quantités de spores de *F. graminearum* au laboratoire en distribuant une quantité connue d'eau de pluie dans des boîtes de Pétri propres contenant le milieu PCNB. Compte tenu de la charge de travail supplémentaire générée par le traitement de l'eau de pluie, celle-ci n'a pas été récupérée pour les boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur de l'essai. Lors des journées de pluie, toutes les boîtes de Pétri orientées vers le haut étaient jetées sans être incubées.

La méthode d'échantillonnage des *Fusarium* spp. utilisée dans ce projet est basée sur celle décrite dans Schmale III et coll. (2005). Contrairement aux capteurs de spores qui ne permettent de mesurer que la quantité de spores présente dans un volume d'air connu, les boîtes de Pétri permettent de capter toute propagule viable susceptible de former une colonie fongique. De plus, il s'agit d'une technique moins coûteuse et plus simple que les capteurs de spores. La procédure d'incubation, de transfert et d'identification des unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* a été décrite précédemment au chapitre 4 (section Materials and Methods).

5.2.3 Analyses statistiques

Plusieurs données manquantes ont été générées par le traitement haut en raison des journées de pluie en 2008. De plus, compte tenu du dispositif expérimental initial qui visait à évaluer l'effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi, les traitements d'orientation des boîtes de Pétri n'ont pu être distribués de manière aléatoire à l'intérieur des blocs. L'analyse statistique a tout de même été réalisée pour les deux années. Cependant, en 2008, les journées de pluie ont été exclues du calcul des moyennes d'UFC de *F. graminearum* des boîtes de Pétri orientées vers le bas afin de concorder avec les résultats des boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur de l'essai. Quant aux boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'extérieur de l'essai, celles-ci n'ont pas été soumises à l'analyse statistique, car ce traitement n'était pas répété à chaque bloc. Pour chaque station et essai, les données d'UFC collectées ont été soumises à une analyse de la variance à l'aide

de la procédure MIXED de SAS. Les traitements d'orientation des boîtes de Pétri correspondaient à l'effet fixe, alors que les blocs constituaient l'effet aléatoire. Afin d'améliorer au maximum l'homogénéité des variances et la normalité des résidus, la plupart des données ont subi une transformation racine carrée (\sqrt{x}) ou une transformation logarithmique ($\log_e x$). La transformation respective utilisée pour chacun des essais est précisée dans les tableaux 9 et 10. Les moyennes ont été comparées au moyen du test LSD protégé de Fisher, au niveau de signification $P \leq 0,05$. Les valeurs ont été détransformées afin d'être présentées dans leur échelle originale. Les coefficients de régression de la relation entre l'inoculum en provenance de l'air et le contenu en DON du blé et de l'orge ont été calculés à partir des moyennes des répétitions et des traitements cultivars des traitements herbicides (2) de tous les essais (3) réalisés aux deux stations (2) et pendant les deux années (2). Ainsi, pour chaque céréale, 24 paires de comparaison ont été incluses dans la régression.

5.3 Résultats et discussion

5.3.1 Caractérisation de l'inoculum en provenance des résidus et de l'air

Le tableau 9 présente les différences de quantités d'UFC récoltées selon que la boîte de Pétri était orientée vers le bas ou vers le haut aux deux stations pour 2007. On y constate que les moyennes d'UFC de *F. graminearum* récoltées quotidiennement par boîte de Pétri orientée vers le haut sont toujours significativement supérieures à celles récoltées par boîte de Pétri orientées vers le bas ($P \leq 0,001$). À Saint-Augustin-de-Desmaures, les valeurs enregistrées pour les boîtes de Pétri orientées vers le haut étaient de 11,1 à 12,6 fois plus élevées par rapport à celles des boîtes de Pétri orientées vers le bas, alors qu'à Saint-Mathieu-de-Beloeil, elles étaient de 3,0 à 4,3 fois supérieures. Enfin, les quantités d'UFC sont numériquement plus élevées à Saint-Mathieu-de-Beloeil qu'à Saint-Augustin-de-Desmaures, quel que soit le traitement (tableau 9).

Tableau 9. Moyennes quotidiennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies quotidiennement durant la période critique d'infection selon l'orientation de la boîte de Pétri dans le blé et l'orge à Saint-Augustin-de-Desmaures et Saint-Mathieu-de-Beloëil, selon trois différents travaux du sol en 2007.

	Saint-Augustin-de-Desmaures			Saint-Mathieu-de-Beloëil		
	TC ^w	TR	SD	TC	TR	SD
	UFC j ⁻¹					
<u>Blé</u>						
Bas	0,24 b ^{xy}	0,30 b ^y	0,14 b ^z	2,15 b ^y	1,94 b ^z	1,42 b ^z
Haut	2,98 a ^y	3,52 a ^y	1,55 a ^z	6,41 a ^y	6,30 a ^z	6,07 a ^z
<u>Orge</u>						
Bas	0,15 b ^y	0,16 b ^y	0,17 b ^z	1,67 b ^z	1,15 b ^y	1,07 b ^y
Haut	1,67 a ^y	2,01 a ^y	1,91 a ^z	3,72 a ^z	4,22 a ^y	3,88 a ^y

^w TC = travail conventionnel; TR = travail réduit; SD = semis direct.

^x Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de $P \leq 0,05$ à l'intérieur de chacune des colonnes de chaque espèce de céréale.

^y Données transformées (\sqrt{x}).

^z Données transformées ($\ln x$).

Le tableau 10 montre quant à lui les différences de quantités d'UFC récoltées selon que la boîte de Pétri était orientée vers le bas ou vers le haut aux deux stations pour 2008. Une distinction est également faite selon que la boîte de Pétri orientée vers le haut se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur de l'essai. On y constate qu'à part l'essai orge/travail réduit de Saint-Augustin-de-Desmaures, les moyennes d'UFC de *F. graminearum* récoltées quotidiennement par boîte de Pétri orientée vers le haut à l'intérieur de l'essai sont toujours significativement supérieures à celles récoltées par boîte de Pétri orientées vers le bas ($P \leq 0,006$). En 2008, les résultats des boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur des essais étaient de 2,4 à 5,9 fois supérieures à celles des boîtes de Pétri orientées vers le bas à Saint-Augustin-de-Desmaures et de 5,5 à 25,4 fois supérieures à Saint-Mathieu-de-Beloëil. Même si les résultats des boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'extérieur des essais n'ont pu être analysés statistiquement, on constate qu'ils sont, sauf une exception, similaires ou inférieurs à ceux des boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur des essais. Enfin, les quantités d'UFC sont numériquement plus élevées à Saint-Mathieu-de-Beloëil qu'à Saint-Augustin-de-Desmaures, mais seulement pour le traitement haut, autant à l'intérieur qu'à l'extérieur des essais (tableau 10).

Tableau 10. Moyennes quotidiennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies quotidiennement durant la période critique d'infection selon l'orientation de la boîte de Pétri dans le blé et l'orge à Saint-Augustin-de-Desmaures et Saint-Mathieu-de-Beloeil, selon trois différents travaux du sol en 2008.

	Saint-Augustin-de-Desmaures			Saint-Mathieu-de-Beloeil		
	TC ^y	TR	SD	TC	TR	SD
UFC j⁻¹						
<u>Blé</u>						
Bas	1,38 b ^x	0,49 b	0,61 b ^y	1,17 b ^z	0,57 b ^y	0,72 b ^y
Haut (int.) ^w	3,33 a	1,85 a	3,09 a ^y	6,47 a ^z	11,31 a ^y	5,93 a ^y
Haut (ext.)	2,67	1,50	3,83	5,71	4,43	4,86
<u>Orge</u>						
Bas	0,93 b	0,44 a ^y	0,28 b ^y	0,53 b ^z	0,47 b ^y	0,52 b ^z
Haut (int.)	2,15 a	1,09 a ^y	1,65 a ^y	5,87 a ^z	11,95 a ^y	7,00 a ^z
Haut (ext.)	2,17	0,25	1,17	5,29	10,43	4,43

^y TC = travail conventionnel; TR = travail réduit; SD = semis direct.

^w int. = intérieur de l'essai; ext. = extérieur de l'essai.

^x Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de $P \leq 0,05$ à l'intérieur de chacune des colonnes de chaque espèce de céréale.

^y Données transformées (\sqrt{x}).

^z Données transformées ($\ln x$).

Il apparaît évident, suite à l'analyse de ces tableaux, que le traitement haut est toujours associé à de plus grandes quantités d'UFC de *F. graminearum* comparativement au traitement bas, et ce, de manière hautement significative pour la quasi-totalité des essais. De plus, même si aucune analyse statistique n'a pu être faite, les résultats provenant des boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'extérieur de l'essai sont 11 fois sur 12 similaires ou inférieurs à ceux des boîtes de Pétri situées à l'intérieur de l'essai. Ces résultats laissent supposer que les boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur des essais capteraient à la fois des UFC provenant de l'intérieur et de l'extérieur de l'essai, et ce, autant en 2007 qu'en 2008. Les résultats dégagés par ce volet exploratoire semblent donc en concordance avec ceux d'autres études qui mentionnent que l'inoculum aérien susceptible d'infecter une culture proviendrait en partie des résidus de culture présents dans les champs avoisinants (Del Ponte et coll., 2003; Maldonado-Ramirez et coll., 2005; Schmale III et coll., 2005).

La différence entre les quantités d'UFC collectées par les boîtes de Pétri orientées vers le haut et celles orientées vers le bas serait également accentuée par la nature des résidus de culture présents à l'intérieur des essais. En effet, ceux-ci provenaient d'une culture de soya, qui est beaucoup moins sensible à la fusariose que le maïs et les céréales. Francl et coll. (1999) mentionnaient d'ailleurs que les résidus de culture à l'intérieur d'un champ pouvaient contribuer à l'infection de la culture de ce champ, mais surtout s'il s'agissait de résidus provenant de cultures hôtes. Or, malgré que les résidus de soya puissent permettre la conservation de *F. graminearum* (Baird et coll., 1997), celle-ci est plus faible qu'avec des résidus de cultures hôtes (Dill-Macky et Jones, 2000; Miller et coll., 1998). La production d'inoculum subséquente est donc diminuée.

On remarque aussi que les moyennes d'UFC de *F. graminearum* sont numériquement plus élevées à Saint-Mathieu-de-Beloeil qu'à Saint-Augustin-de-Desmaures, et ce, particulièrement pour les boîtes de Pétri orientées vers le haut. Ces différences peuvent facilement être expliquées par le profil agricole des deux régions. À Saint-Mathieu-de-Beloeil, localité située en Montérégie, la culture de maïs est très fréquente. Celle-ci génère de grandes quantités de résidus de culture hôtes favorables à la colonisation par *F. graminearum*, ce qui permet une production plus élevée d'inoculum aérien susceptible d'infecter les cultures de céréales environnantes. Par contre, à Saint-Augustin-de-Desmaures, dans la région de Québec, le maïs est beaucoup moins présent et est remplacé par des cultures qui produisent moins de résidus et qui sont moins sensibles à la fusariose, comme les prairies. Ainsi, tel qu'expliqué par Del Ponte et coll. (2003), les rotations de culture effectuées à l'échelle de la région pourraient influencer la production d'inoculum aérien de *F. graminearum*, et donc, la présence de la fusariose de l'épi.

5.3.2 Caractérisation de l'inoculum selon les conditions climatiques

Compte tenu que le travail du sol n'a pu être évalué en raison de l'absence de répétitions, tous les graphiques de cette section représentent des résultats où les travaux du sol ont été combinés.

Les UFC de *F. graminearum* provenant des résidus de culture ou de l'air étaient pratiquement inexistantes avant la période critique d'infection pour les essais de blé et d'orge à Saint-Augustin-de-Desmaures en 2007 (figures 3 et 4). On observe une légère augmentation des quantités d'UFC durant la période critique d'infection, mais elles demeurent tout de même plutôt faibles. Ce n'est qu'au dernier jour de la période d'échantillonnage que l'on observe une réelle augmentation de la sporulation, avec un pic atteignant plus de 35 UFC de *F. graminearum* par jour par boîte de Pétri orientée vers le haut (figure 3). Ce pic semble un peu plus modeste chez l'orge avec une production de près de 20 UFC de *F. graminearum* par jour par boîte de Pétri orientée vers le haut (figure 4).

Dans les deux cas, on constate que deux épisodes de pluie de plus de 5 mm ont eu lieu deux et quatre jours avant le pic de sporulation survenu lors du dernier jour de la période d'échantillonnage. Ceci concorde avec les résultats de précédentes études concernant les conditions requises pour le relâchement des ascospores (Fernando et coll., 2000; Inch et coll., 2005; Paulitz, 1996). Cependant, d'autres épisodes de pluie de cette envergure se sont produits avant la période critique, et pourtant, les quantités d'UFC détectées dans l'air étaient très faibles comparativement à la dernière journée d'échantillonnage.

Ceci peut être expliqué en partie par l'analyse des conditions climatiques prévalant durant toute la période d'échantillonnage. Si l'on porte attention aux données météorologiques recueillies jusqu'aux épisodes de pluie des jours 190 et 192, c'est-à-dire ceux qui ont mené au fort pic de sporulation, on remarque deux éléments. D'une part, mis à part quelques journées, les températures moyennes quotidiennes enregistrées sont plutôt fraîches, avec des valeurs en-dessous de 20 °C; d'autre part, excepté les quelques épisodes de pluie, l'humidité relative moyenne quotidienne est généralement faible (annexe C). La production d'ascospores nécessite des températures se situant entre 13 et 33 °C avec un optimum entre 25 et 28 °C (Sutton, 1982), alors que la production des macroconidies est favorisée par des températures allant de 16 à 36 °C avec un optimum entre 28 et 32 °C (Doohan et coll., 2003). De plus, les deux types de spores requièrent une forte humidité pour être produites (Sutton, 1982; Xu, 2003). Ces conditions n'étaient pas vraiment réunies à Saint-Augustin-de-Desmaures au cours de cette période en 2007. Par conséquent, il semble normal que l'inoculum aérien mesuré soit faible au cours de cette période. En

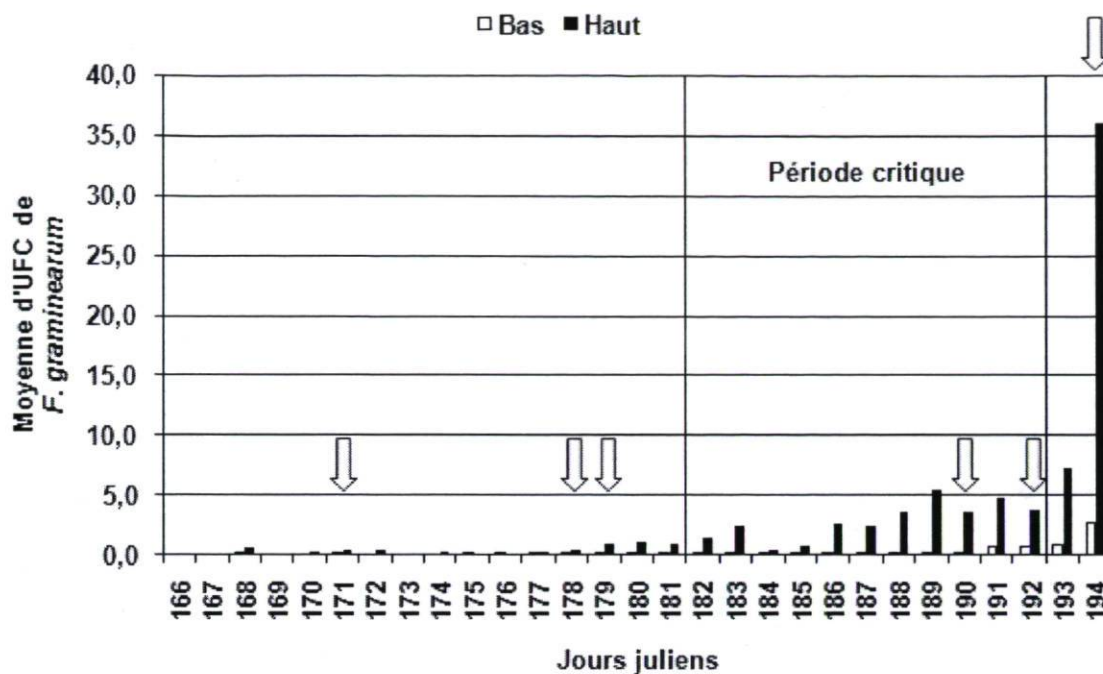


Figure 3. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais de blé de Saint-Augustin-de-Desmaures en 2007. (La zone délimitée par deux lignes verticales représente la période critique d'infection du blé. Les flèches indiquent les jours où il est tombé plus de 5 mm de pluie.)

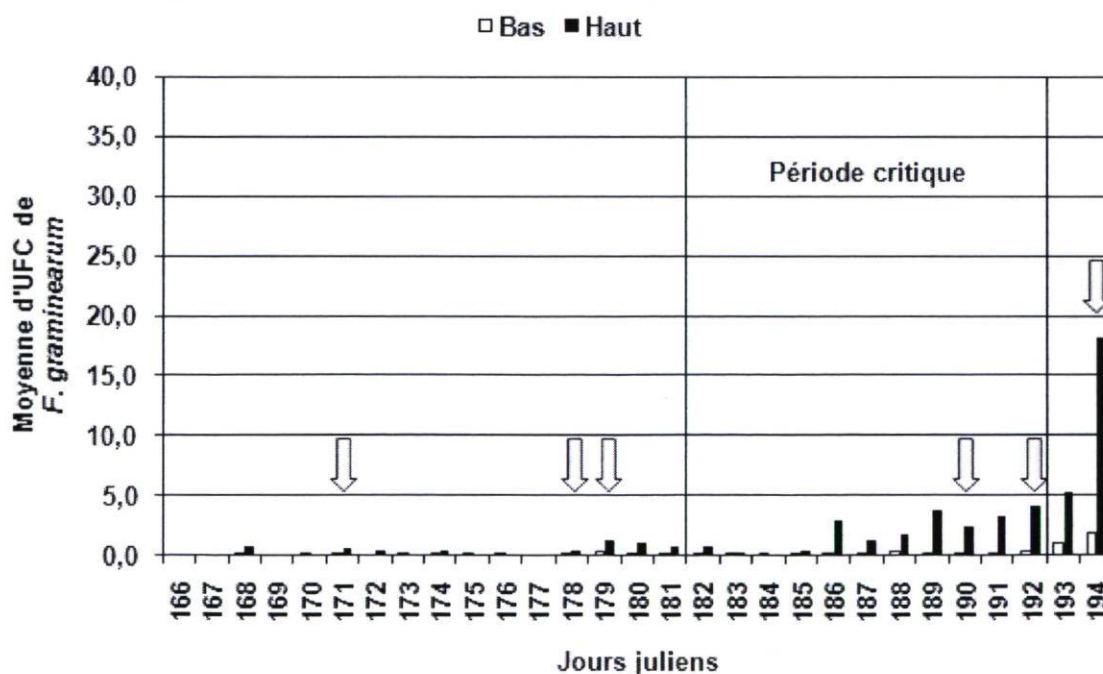


Figure 4. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais d'orge de Saint-Augustin-de-Desmaures en 2007. (La zone délimitée par deux lignes verticales représente la période critique d'infection de l'orge. Les flèches indiquent les jours où il est tombé plus de 5 mm de pluie.)

revanche, suite à l'épisode de pluie survenu au jour 190, les températures moyennes quotidiennes sont montées au-dessus de 20 °C. L'arrivée simultanée de conditions plus chaudes et humides aurait donc permis une production plus abondante d'inoculum suivie de son relâchement dans l'air.

En 2008, les conditions météorologiques à Saint-Augustin-de-Desmaures ont été bien différentes de celles de 2007. Les épisodes de pluie de plus de 5 mm ont été extrêmement fréquents tout au long de la période d'échantillonnage des essais de blé et d'orge, rendant difficile l'interprétation de leur effet sur la production d'inoculum aérien (figures 5 et 6). Compte tenu de toutes ces journées de pluie, de nombreuses données manquantes ont été générées pour le traitement haut à l'intérieur de l'essai. Néanmoins, il est possible de constater que, autant dans les essais de blé que d'orge, la production d'UFC est plutôt constante durant toute la période d'échantillonnage et augmente légèrement vers la fin de la période critique et après celle-ci. Les quantités recueillies les plus élevées varient entre 10 et 15 UFC de *F. graminearum* par jour par boîte de Pétri orientée vers le haut, autant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'essai (figures 5 et 6).

Les températures quotidiennes moyennes mesurées tout au long de la période d'échantillonnage sont généralement faibles. Avant et après la période critique, elles dépassent à peine les 20 °C. Seules quelques journées de la période critique sont caractérisées par une température légèrement supérieure à ce seuil. Par contre, contrairement à 2007, l'humidité relative est généralement très élevée : 28 des 39 jours de la période d'échantillonnage sont caractérisés par une humidité relative de plus de 80 % (annexe C). Ainsi, malgré que les températures soient plus ou moins favorables à la production d'ascospores et de macroconidies, les conditions très humides permettent une certaine formation d'inoculum. De plus, grâce aux nombreux épisodes de pluie, la dispersion des macroconidies était possible (Rossi et coll., 2002). En revanche, Paulitz (1996) avait déjà mentionné que le relâchement des ascospores était réduit lors des journées où l'humidité relative dépassait 80 %. Étant donné l'importante contribution des ascospores à l'inoculum aérien, ceci pourrait expliquer pourquoi celui-ci n'était pas si élevé.

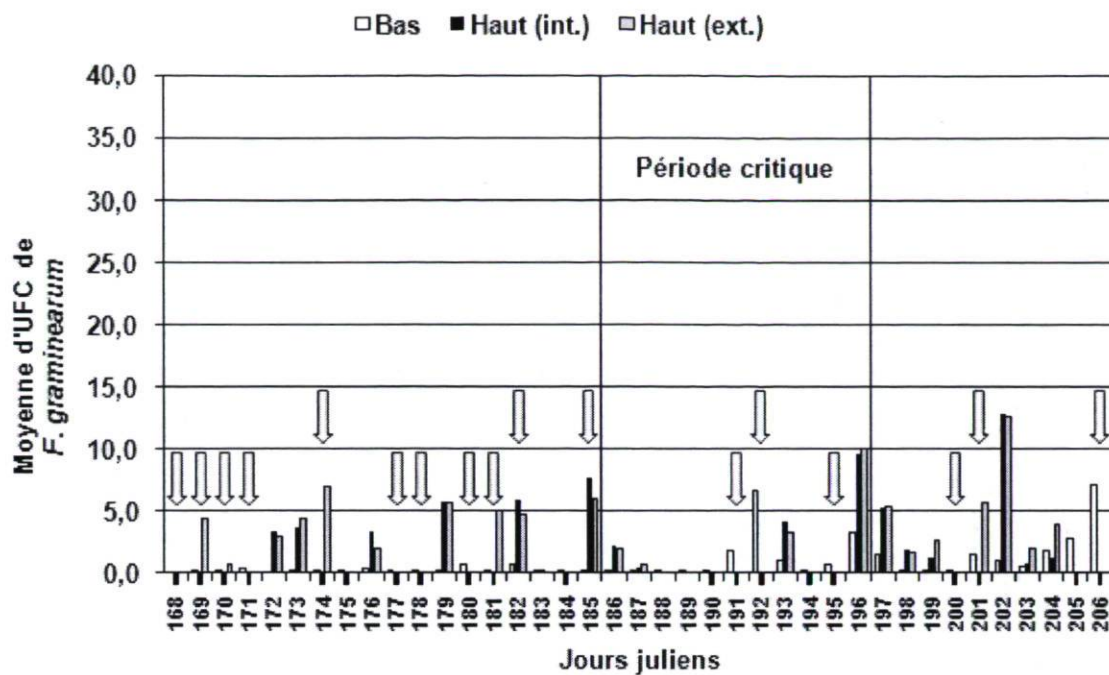


Figure 5. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais de blé de Saint-Augustin-de-Desmaures en 2008. (La zone délimitée par deux lignes verticales représente la période critique d'infection du blé. Les flèches indiquent les jours où il est tombé plus de 5 mm de pluie.)

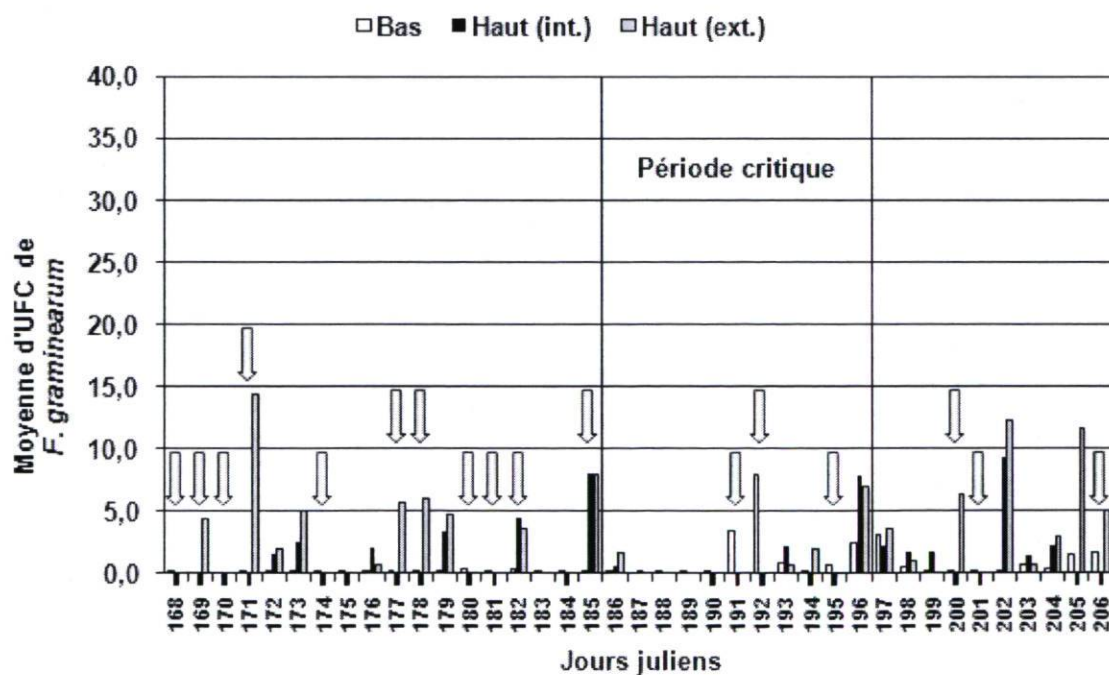


Figure 6. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais d'orge de Saint-Augustin-de-Desmaures en 2008. (La zone délimitée par deux lignes verticales représente la période critique d'infection de l'orge. Les flèches indiquent les jours où il est tombé plus de 5 mm de pluie.)

La production d'inoculum de Saint-Mathieu-de-Beloil n'a pas été influencée de la même manière que celle de Saint-Augustin-de-Desmaures pour les deux années du projet. En 2007, dans les essais de blé comme dans ceux d'orge, un fort pic de sporulation est survenu dans la première semaine d'échantillonnage (jour 172), avec plus de 35 UFC de *F. graminearum* collectées par jour par boîte de Pétri orientée vers le haut (figures 7 et 8). Par la suite, la présence d'UFC dans l'air s'est maintenue plutôt constante avec de légères augmentations quelques jours après les épisodes de pluie de plus de 5 mm. Cependant, tout comme à Saint-Augustin-de-Desmaures en 2007, on observe encore des différences entre les espèces de céréales. À compter de la période critique, les quantités d'UFC collectées diminuent environ de moitié dans les essais d'orge comparativement aux essais de blé (figures 7 et 8).

La température moyenne pour la période précédant le fort pic de sporulation était de 21,6 °C. De plus, malgré qu'un seul épisode de plus de 5 mm de pluie soit survenu seulement une journée avant l'augmentation des UFC dans l'air, l'apport de précipitations a tout de même été plutôt régulier au courant de cette période (annexe C). Par conséquent, ces conditions chaudes et humides étaient fort propices pour la production et la dispersion d'ascospores et de macroconidies qui ont fort probablement contribué à la formation de l'inoculum aérien.

Quant à la présence plutôt constante d'inoculum aérien dans les essais de blé et d'orge de Saint-Mathieu-de-Beloil en 2007, ceci peut être expliqué par des températures quotidiennes pratiquement toujours favorables pour la production et le relâchement d'ascospores et par de fortes variations dans l'humidité relative de l'air, particulièrement durant la période critique (annexe C). On sait que la production d'ascospores de *F. graminearum* est favorisée par des conditions humides (Sutton, 1982). Cependant, tel que mentionné précédemment, une humidité relative de plus de 80 % réduit considérablement le relâchement d'ascospores (Paulitz, 1996). Durant la période d'échantillonnage, les augmentations d'UFC dans l'air coïncidaient parfois avec ces baisses d'humidité relative. Ainsi, les variations marquées de l'humidité de l'air à Saint-Mathieu-de-Beloil en 2007 auraient permis à la fois la production et le relâchement d'ascospores, menant ainsi à la formation d'un inoculum aérien abondant. Malgré que les conditions

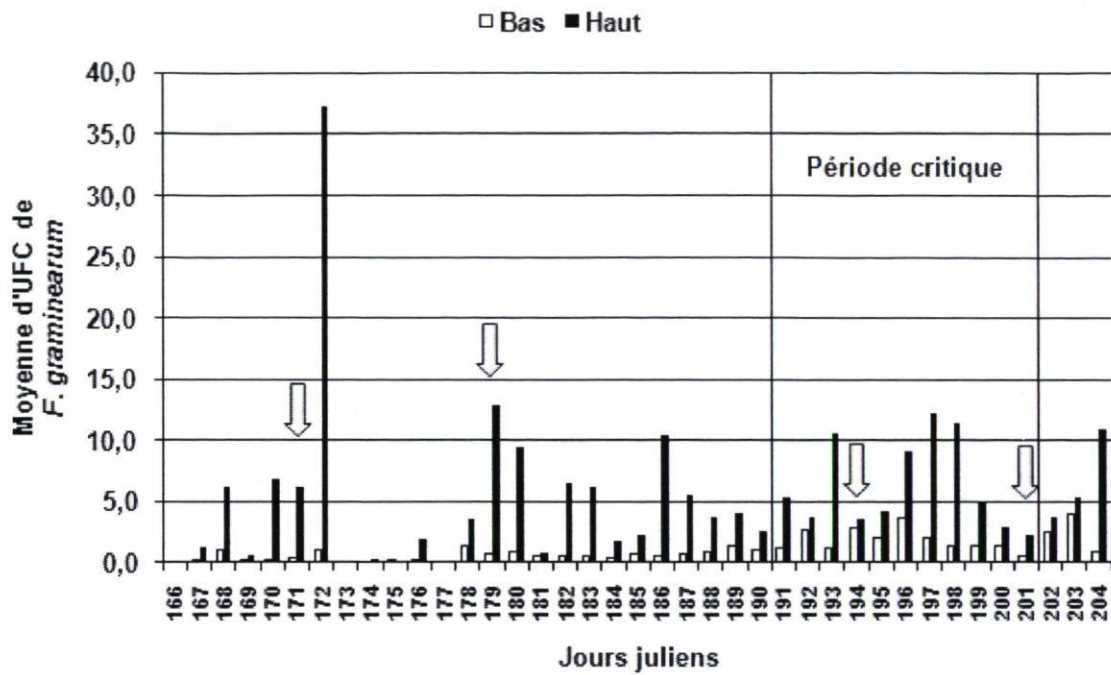


Figure 7. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais de blé de Saint-Mathieu-de-Beloëil en 2007. (La zone délimitée par deux lignes verticales représente la période critique d'infection du blé. Les flèches indiquent les jours où il est tombé plus de 5 mm de pluie.)

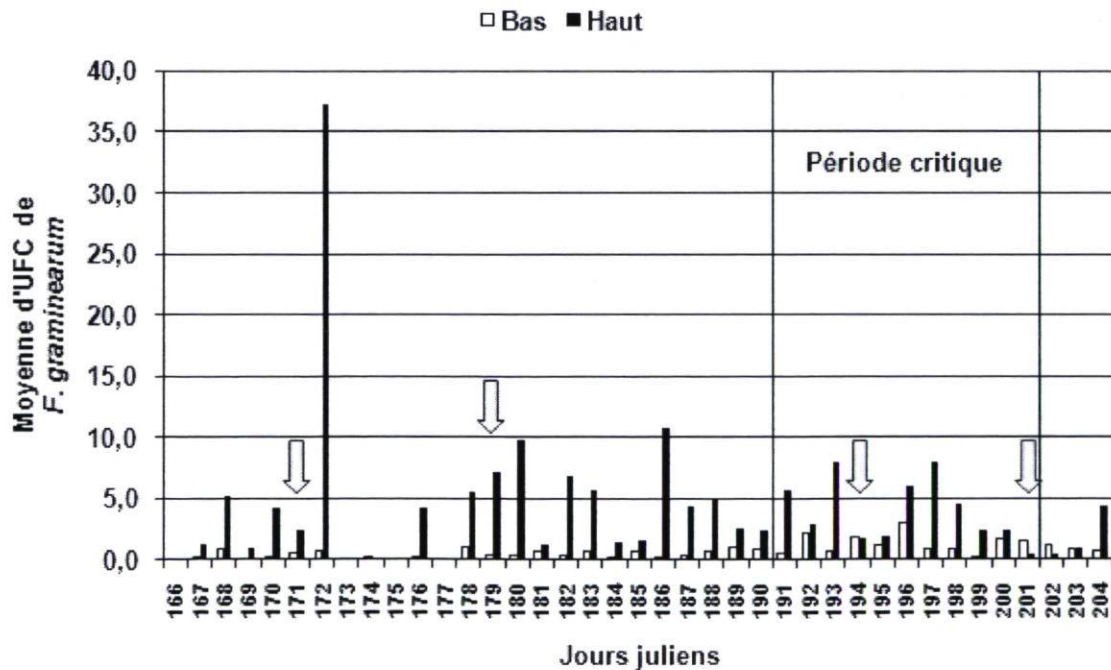


Figure 8. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais d'orge de Saint-Mathieu-de-Beloëil en 2007. (La zone délimitée par deux lignes verticales représente la période critique d'infection de l'orge. Les flèches indiquent les jours où il est tombé plus de 5 mm de pluie.)

étaient également favorables pour la production de macroconidies, on ne sait pas si les épisodes de pluie ont permis de transporter ces spores d'un étage foliaire à l'autre jusqu'aux épis au moment de la période critique.

C'est à Saint-Mathieu-de-Beloeil, en 2008, que les plus grandes quantités d'UFC de *F. graminearum* ont été recueillies par les boîtes de Pétri orientées vers le haut. En excluant les journées où les données pour les boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur de l'essai n'étaient pas disponibles en raison de la pluie, plus de 35 UFC de *F. graminearum* ont parfois été collectées par jour par boîte de Pétri orientée vers le haut (figures 9 et 10). Les épisodes de pluie de plus de 5 mm semblent généralement suivis d'un relâchement plus intense d'UFC, excepté au début de la période d'échantillonnage. De nombreux épisodes de production d'UFC plus intenses sont présents tout au long de la période d'échantillonnage (figures 9 et 10).

Les températures moyennes quotidiennes enregistrées à Saint-Mathieu-de-Beloeil en 2008 étaient au-dessus de 20 °C pour 21 des 36 jours de la période d'échantillonnage, alors que 23 jours sur 36, l'humidité relative excédait 80 % (annexe C). Ces conditions étaient très favorables autant pour la production des macroconidies que des ascospores. Tout comme en 2007, l'humidité relative avait tendance à varier de manière plutôt importante durant toute la période d'échantillonnage, favorisant ainsi le relâchement des ascospores. Cependant, contrairement à ce que Paulitz (1996) mentionnait, les plus fortes quantités d'UFC enregistrées l'ont été lorsque l'humidité relative était plus élevée que 80 %. Il est possible que les journées moins humides qui précédaient aient favorisé le relâchement des ascospores, mais à retardement, donnant ainsi l'impression que le relâchement avait lieu lorsque l'humidité était élevée. Enfin, étant donné les précipitations fréquentes et abondantes à cette station en 2008, les macroconidies ont probablement pu atteindre les épis.

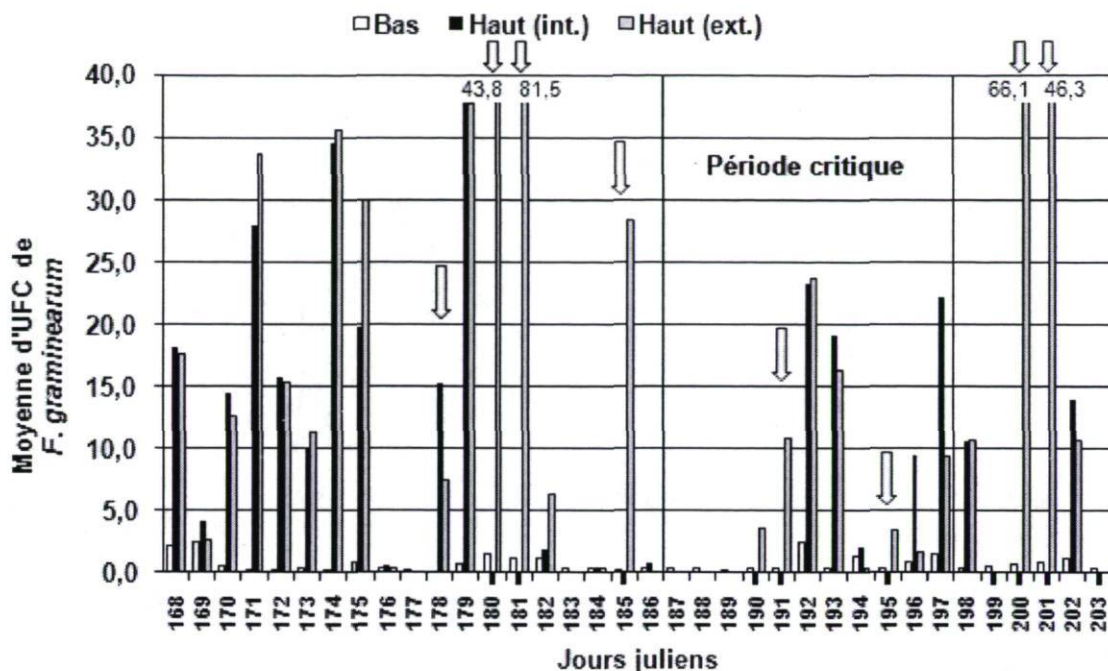


Figure 9. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais de blé de Saint-Mathieu-de-Beloil en 2008. (La zone délimitée par deux lignes verticales représente la période critique d'infection du blé. Les flèches indiquent les jours où il est tombé plus de 5 mm de pluie.)

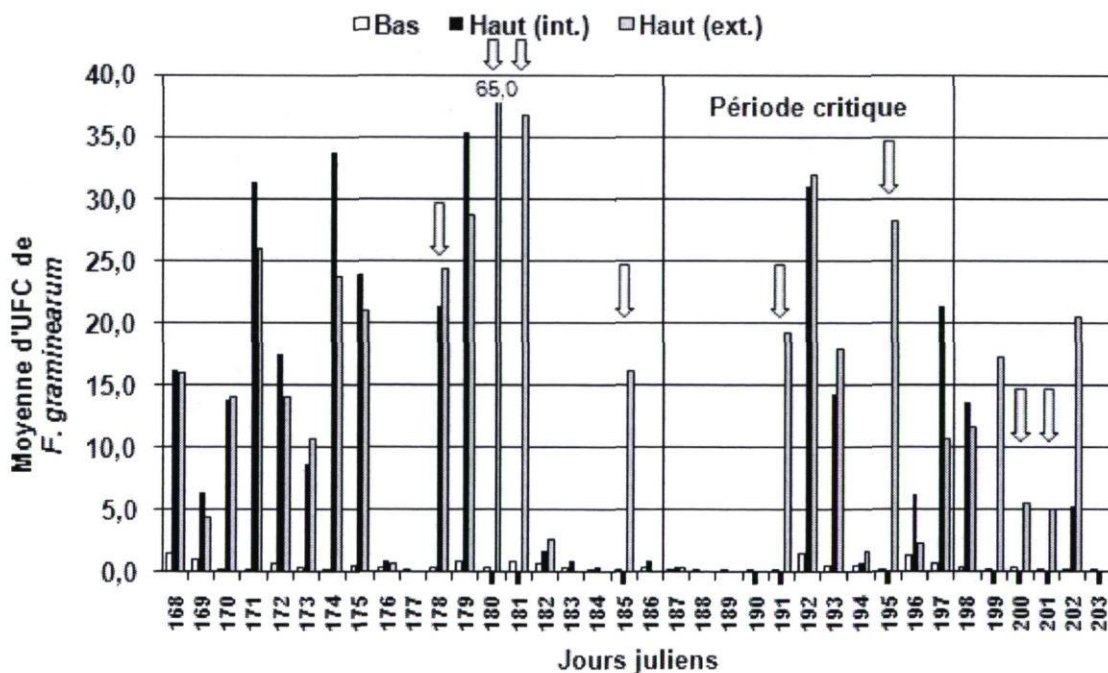


Figure 10. Moyennes d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* recueillies selon le temps et l'orientation de la boîte de Pétri dans les essais d'orge de Saint-Mathieu-de-Beloil en 2008. (La zone délimitée par deux lignes verticales représente la période critique d'infection de l'orge. Les flèches indiquent les jours où il est tombé plus de 5 mm de pluie.)

Il est difficile d'expliquer pourquoi les quantités d'UFC collectées par les boîtes de Pétri orientées vers le haut étaient presque toujours plus faibles dans les essais d'orge que dans les essais de blé en 2007, aux deux stations. Les différences observées se manifestaient surtout vers la fin de la période d'échantillonnage. Une tentative d'explication pourrait être faite en se basant sur le degré d'infection des deux céréales. Dans notre expérience, on a pu constater que les grains de blé contenaient plus de DON que ceux d'orge (chapitre 4). Par conséquent, il est probable que les épis de blé étaient davantage infectés par *F. graminearum*. Si tel est le cas, il se pourrait qu'une production d'inoculum secondaire en provenance des épis infectés soit survenue (Sutton, 1982). Les macroconidies ainsi produites auraient pu être éclaboussées jusqu'aux boîtes de Pétri orientées vers le haut, qui étaient un peu plus basses en 2007 qu'en 2008. Toutefois, la fusariose de l'épi est généralement considérée comme une maladie monocyclique (Fernando et coll., 1997; Madden et Paul, 2009; Shaner, 2003). De plus, malgré que les boîtes de Pétri orientées vers le haut aient été plus hautes en 2008, cette tendance ne se répète pas vraiment, alors que les conditions climatiques étaient davantage propices à l'infection. Il s'agit donc d'une hypothèse plutôt difficile à vérifier.

5.3.3 Relation entre l'inoculum en provenance de l'air et le contenu en DON

La relation entre l'inoculum de *F. graminearum* provenant de résidus de culture de soya et le contenu en DON a déjà été évaluée (chapitre 4). Celle-ci s'était révélée plutôt faible. Il serait donc intéressant de vérifier si le contenu en DON serait davantage lié à l'inoculum aérien au-dessus de la parcelle mesuré par les boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur de l'essai. Cette relation est représentée à la figure 11.

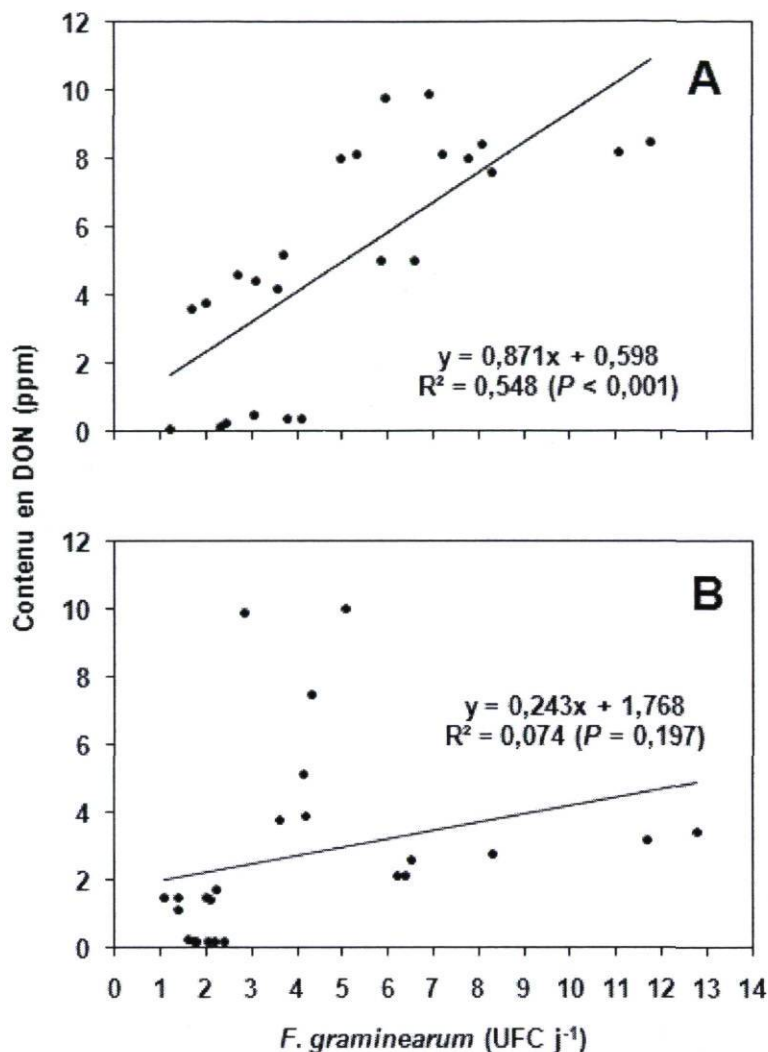


Figure 11. Relation entre la moyenne quotidienne d'unités formant une colonie (UFC) de *F. graminearum* mesurée par les boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur des essais durant la période critique d'infection et le contenu en DON. (A : grains de blé; B : grains d'orge. Pour chaque céréale, 24 paires de comparaison ont été incluses dans le calcul de régression, soit : deux paires de comparaison (moyenne G-cultivar et moyenne NG-cultivar) de chaque essai (3), station (2) et année (2).)

On y observe que dans les essais de blé, le coefficient de régression est hautement significatif ($P < 0,001$; $R^2 = 0,548$), alors que dans les essais d'orge, il ne l'est pas ($P = 0,197$; $R^2 = 0,074$). Contrairement à l'inoculum capté par les boîtes de Pétri vers le bas, le fait de retirer les faibles valeurs de DON ne change pas vraiment les coefficients de régression. Tout comme avec l'inoculum en provenance des résidus de culture, il existe une forte variabilité entre les années et les stations observées. Cependant, même en analysant chaque combinaison d'année et de station séparément, il ne ressort pas de réelle différence

dans la relation entre les deux variables. Ainsi, pour les essais de blé, le contenu en DON semblerait plus fortement associé à l'inoculum aérien au-dessus de la parcelle que celui en provenance des résidus de culture de la parcelle. Ceci est d'autant plus logique que le précédent cultural des parcelles est du soya, une culture peu sensible à la fusariose de l'épi. Par contre, pour ce qui est des essais d'orge, la production de DON dans les grains ne semble pas plus associée à l'inoculum aérien au-dessus de la parcelle qu'à l'inoculum formé par les UFC en provenance des résidus de culture. Le blé serait donc davantage influencé par la présence de *F. graminearum* dans l'air durant la période critique d'infection que l'orge.

Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'orge demeure réceptive à l'infection à n'importe quel moment entre l'épiaison et la maturité, ce qui n'est pas le cas pour le blé (Bailey et coll., 2004). Il est donc possible que la période critique que nous avons prédéterminée pour le blé soit adéquate, mais que celle pour l'orge soit trop restreinte pour permettre d'observer un lien entre la quantité d'UFC et le contenu en DON.

En revanche, il ne faut pas oublier que la seule présence de *F. graminearum* dans l'air ne suffit pas à ce qu'il y ait infection, et ce, même dans le cas du blé (Schlang et coll., 2008). Les températures doivent se maintenir entre 20 et 30 °C et l'humidité doit persister sur les épis pour une période de 48 à 60 heures afin de permettre une infection optimale (Sutton, 1982). Le lien entre la présence de *F. graminearum* dans l'air et la production de DON n'est donc pas si simple à faire.

5.4 Conclusion

Selon les résultats de cette expérience, il semble que l'inoculum aérien au-dessus de la parcelle et en provenance de l'extérieur du champ contribue de manière importante à l'inoculum aérien total susceptible d'infecter les épis, comparativement à celui en provenance des résidus de culture de soya de la parcelle. Les quantités d'UFC mesurées durant la période critique d'infection par les boîtes de Pétri orientées vers le haut sont de 2,4 à 25,4 fois plus élevées par rapport aux boîtes de Pétri orientées vers le bas. L'inoculum est numériquement plus abondant à Saint-Mathieu-de-Beloeil qu'à Saint-Augustin-de-

Desmaures. Ceci peut être expliqué par la forte présence du maïs dans cette région, une culture hôte générant une grande quantité de résidus. Les rotations de culture à l'échelle du champ, mais aussi de la région semblent donc à privilégier. De plus, les conditions climatiques jouent un très grand rôle dans la quantité d'inoculum retrouvée dans l'air. Celles-ci influencent la production, mais aussi le relâchement des spores. Les conditions climatiques agissent également sur le processus d'infection par *F. graminearum*. Par contre, les conditions de température et d'humidité ne sont pas exactement les mêmes pour chacune de ces étapes et varient énormément d'une station à l'autre et d'une année à l'autre. Par conséquent, il devient très difficile de bien caractériser l'évolution de l'inoculum de *F. graminearum* dans le temps. Malgré cela, la présence de *F. graminearum* dans l'air ne garantit pas le développement de la maladie et la production de DON dans les grains. Voilà pourquoi l'élaboration de modèles prévisionnels du contenu en DON des grains est plutôt complexe. D'autres facteurs tels que la sensibilité du cultivar et la présence d'autres espèces de *Fusarium* causant des symptômes visuels sans engendrer la production de DON doivent être considérés. La prédominance de ces différentes espèces sera discutée plus en détails dans le chapitre qui suit.

6. Distribution relative et prédominance des principales espèces de *Fusarium* responsables de la fusariose de l'épi de deux régions du Québec

6.1 Introduction

Au Canada comme partout dans le monde, la principale espèce responsable de la fusariose de l'épi est sans contredit *F. graminearum* (Bailey et coll., 2004; Gilbert et Tekauz, 2000; Tekauz et coll., 2000). Celle-ci serait davantage présente dans l'est du pays, mais est également rapportée ailleurs au Canada (Clear et Abramson, 1986). *F. graminearum* est le principal champignon du genre *Fusarium* à être isolé d'épis de blé analysés au Manitoba (Stack et McMullen, 1985; Wong et coll., 1992). Toujours dans cette province, il s'agit également de l'espèce la plus fréquemment retrouvée sur les grains de blé de printemps et de blé dur (Clear et Abramson, 1986; Clear et coll., 2005; Wong et coll., 1992), de même que sur les grains d'orge (Clear et coll., 2000). La même situation se répète chez le blé et l'orge sous les conditions de culture du Québec (Bourdages et coll., 2006; Fauzi, 1992, cité dans Fernando et coll., 2000).

Cependant, d'autres espèces de *Fusarium* ont aussi été répertoriées et leur proportion varie selon que l'on se trouve dans l'Ouest ou l'Est canadien. Dans les Prairies, particulièrement en Alberta, *F. graminearum* est pratiquement absent des grains infectés, alors que *F. avenaceum* est l'espèce la plus présente sur les grains de blé de printemps, de blé dur et d'orge (Clear et coll., 2000; Clear et coll., 2005). Au Manitoba, les principales espèces détectées autres que *F. graminearum* sont *F. culmorum*, *F. poae* et *F. sporotrichioides*, autant sur les épis que sur les grains de blé infectés (Stack et McMullen, 1985; Wong et coll., 1992). Dans l'air au-dessus de champs de blé localisés à Ottawa, on a capté les espèces de *Fusarium* suivantes en ordre décroissant de densité de spores : *F. graminearum*, *F. crookwellense*, *F. sporotrichioides*, *F. moniliforme*, *F. equiseti*, *F. subglutinans* et *F. culmorum* (Fernando et coll., 2000). Une autre étude réalisée dans l'Est canadien a permis de détecter une forte présence de *F. avenaceum*, de *F. graminearum* et de

F. sporotrichioides dans l'environnement (Martin, 1988). Selon ce chercheur, 93 % de toutes les spores captées proviennent de ces trois espèces réunies. Enfin, au Québec, les autres espèces de *Fusarium* les plus fréquemment isolées des grains de blé sont *F. sporotrichioides*, *F. poae* et *F. equiseti* (Fauzi, 1992, cité dans Fernando et coll., 2000), alors que pour les grains d'orge, il s'agissait plutôt de *F. poae*, *F. avenaceum* et, de manière moins marquée, *F. sporotrichioides* (Bourdages et coll., 2006).

La variation de l'abondance de certaines espèces de *Fusarium* impliquées dans la fusariose de l'épi est en partie attribuable aux conditions climatiques d'une région donnée. Xu et coll. (2008a) sont parvenus à démontrer que même si les principales espèces de champignons associées à la fusariose requièrent des conditions environnementales similaires pour leur développement, il existe tout de même certaines variations. Par exemple, *F. poae* est davantage associé à des conditions plus chaudes et sèches, alors que *F. graminearum* prolifère mieux dans des conditions chaudes et humides. Quant à *F. avenaceum* et *F. culmorum*, ceux-ci sont plus abondants sous des conditions fraîches et humides. De même, l'étude réalisée par Bourdages et coll. (2006) a permis d'établir que les principales espèces de *Fusarium* retrouvées sur des grains d'orge varient selon la région du Québec d'où ils proviennent. Par exemple, *F. graminearum* est davantage présent dans le sud du Québec, *F. avenaceum*, à l'est du Québec, et *F. poae*, au nord du fleuve Saint-Laurent.

Compte tenu du nombre élevé de différentes espèces de *Fusarium* généralement isolées d'un même milieu, l'expression « complexe d'infection » est généralement utilisée pour leur faire référence (Bottalico et Perrone, 2002). Cependant, la virulence, c'est-à-dire le pouvoir relatif d'infection de chacune des espèces, varie considérablement à l'intérieur du complexe. En général, *F. graminearum* et *F. culmorum* sont reconnues pour être les deux espèces les plus virulentes chez le blé (Stack et McMullen, 1985; Wong et coll., 1992) et chez l'orge (Xue et coll., 2006). Comme ces espèces ont davantage de facilité à infecter leur hôte, les toxines qui leur sont associées risquent d'être produites en plus grande quantité. Il a d'ailleurs été prouvé que la présence de DON dans les grains était davantage associée à la présence de *F. graminearum* qu'à toute autre espèce de *Fusarium* (Xu et coll., 2008b). Par contre, d'autres espèces moins virulentes ou opportunistes faisant partie du

complexe d'infection peuvent également parvenir à produire leurs toxines. Il n'est donc pas improbable d'observer la présence de moniliformine, produite par *F. avenaceum*, ou de T-2 et HT-2, produites par *F. sporotrichioides* (Bottalico et Perrone, 2002), deux toxines très toxiques pour les animaux.

Ce volet exploratoire vise à déterminer la distribution relative et la prédominance des différentes espèces de *Fusarium* associées à la fusariose de l'épi de deux régions du Québec caractérisées par différentes conditions environnementales.

6.2 Matériel et méthodes

6.2.1 Mise en place des essais

L'expérience a été répétée sur deux années (2007-2008) à deux stations expérimentales aux conditions climatiques différentes de la province de Québec, soit à la Station agronomique de l'Université Laval à Saint-Augustin-de-Desmaures et au Centre de recherche sur les grains (CÉROM) de Saint-Mathieu-de-Beloeil.

Des informations supplémentaires concernant la mise en place des essais sont disponibles à la section « Materials and Methods » du chapitre 4 et à la section « Matériel et méthodes » du chapitre 5.

6.2.2 Prise de données

Les données utilisées pour ce volet proviennent des mêmes boîtes de Pétri utilisées pour le volet décrit au chapitre 5. Par conséquent, la méthodologie utilisée pour l'installation, les périodes d'échantillonnage et la récupération des boîtes de Pétri était la même. Cependant, seules les données collectées durant la période critique ont été utilisées pour ce volet expérimental. De plus, il est à noter que le milieu de culture contenu dans les boîtes de Pétri placées au champ ne recueillait pas exclusivement les propagules viables de *F. graminearum*. Elles permettaient également de capter d'autres espèces de *Fusarium*. Ainsi, les UFC transférées sur le milieu d'identification ne correspondaient pas toutes à *F. graminearum*. Il a été possible d'identifier deux autres espèces à l'aide du milieu

d'identification, soit *F. sporotrichoides* et *F. avenaceum*. *F. sporotrichoides* formait des colonies rouge framboise surmontées de petites taches blanches, alors que *F. avenaceum* produisait des colonies jaunâtres. Toutes les autres espèces de *Fusarium* autres que celles identifiables étaient classées dans la catégorie « Autres *Fusarium* ». Ceux-ci n'étaient identifiés à l'espèce qu'une journée par semaine durant toute la période d'échantillonnage, à l'aide d'un microscope. En 2007, l'échantillonnage complet a été fait les 21 et 28 juin et les 5 et 12 juillet pour les deux stations. En 2008, il a été effectué les 20 et 27 juin et les 4, 11 et 18 juillet, également pour les deux stations.

Des informations supplémentaires concernant la prise de données sont disponibles à la section « Materials and Methods » du chapitre 4 et à la section « Matériel et méthodes » du chapitre 5.

6.2.3 Analyse des données

L'objectif de ce volet était de décrire qualitativement la diversité et la prédominance des différentes espèces de *Fusarium* aux deux stations, Saint-Augustin-de-Desmaures et Saint-Mathieu-de-Beloëil, à chacune des années d'échantillonnage (2007-2008). Par conséquent, aucune analyse statistique n'a été faite sur ces données. Afin de réduire le nombre de figures, les données en provenance des deux céréales ont été mises en commun. Également, les boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'extérieur des essais en 2008 n'ont pas été utilisées dans le cadre de cette analyse. Enfin, comme au chapitre 5, les journées de pluie ont été exclues de l'évaluation de la diversité et de la prédominance des espèces de *Fusarium* présentes dans les boîtes de Pétri orientées vers le bas afin de concorder avec les résultats des boîtes de Pétri orientées vers le haut situées à l'intérieur de l'essai en 2008.

6.3 Résultats et discussion

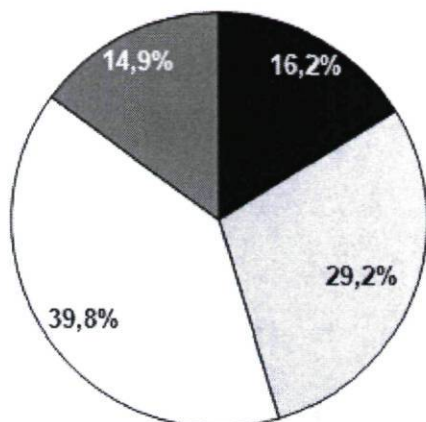
Peu importe la station ou l'année, les espèces *F. graminearum*, *F. sporotrichioides* et *F. avenaceum* réunies représentaient la majeure partie des espèces de *Fusarium* liées à la fusariose de l'épi durant les périodes critiques d'infection du blé et de l'orge. Parmi les stations et les années, de 60,3 à 89,2 % des *Fusarium* recueillis par les boîtes de Pétri

orientées vers le bas provenaient de ces trois espèces, alors que pour les boîtes de Pétri orientées vers le haut, les proportions oscillaient entre 72,7 et 91,8 %. Ces résultats concordent assez bien avec ceux de Martin (1988), qui mentionnait que 93 % des espèces de *Fusarium* retrouvées dans un champ de blé de l'Est canadien regroupaient *F. graminearum*, *F. sporotrichioides* et *F. avenaceum*.

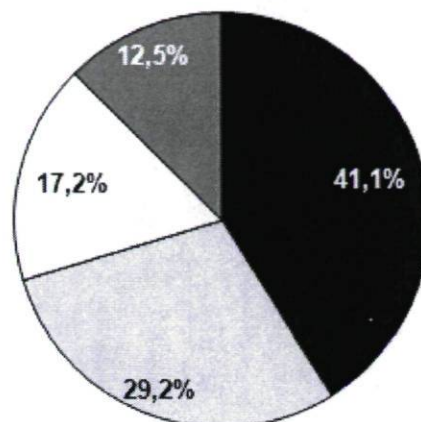
La distribution relative des espèces de *Fusarium* recueillies durant la période critique d'infection du blé et de l'orge à Saint-Augustin-de-Desmaures en 2007 est illustrée à la figure 12. *F. avenaceum* est l'espèce prédominante des boîtes de Pétri orientées vers le bas, avec une valeur de 39,8 %, suivie de *F. sporotrichioides* à 29,2 %. *F. graminearum* arrive en troisième place avec une valeur de 16,2 %. Cet ordre est inversé dans les boîtes de Pétri orientées vers le haut, avec *F. graminearum* comme espèce prédominante à 41,1 %, suivie de *F. sporotrichioides* à 29,2 % et de *F. avenaceum* à 17,2 %. La catégorie des autres *Fusarium* est la moins prédominante des boîtes de Pétri orientées vers le bas et vers le haut, avec des valeurs respectives de 14,9 % et de 12,5 % (figure 12).

En 2008 et toujours à Saint-Augustin-de-Desmaures, *F. avenaceum* demeure l'espèce prédominante dans les boîtes de Pétri orientées vers le bas à 44,5 %. Toutefois, elle est suivie de *F. graminearum* à 24,9 % et c'est *F. sporotrichioides* qui arrive troisième avec une valeur de 19,8 % (figure 13). Dans les boîtes de Pétri orientées vers le haut, *F. graminearum* et *F. sporotrichioides* arrivent à égalité en matière de prédominance avec 32,8 % chacune, suivie de près par *F. avenaceum* avec une valeur de 26,2 %. Comme en 2007, les autres *Fusarium* arrivent au dernier rang, avec des valeurs encore plus faibles : 10,7 % pour les boîtes de Pétri orientées vers le bas et 8,3 % pour celles orientées vers le haut (figure 13).

Boîtes de Pétri orientées vers le bas



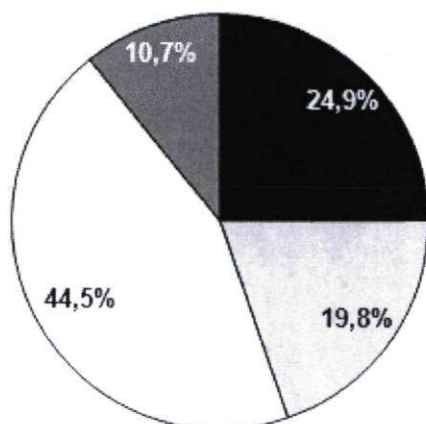
Boîtes de Pétri orientées vers le haut



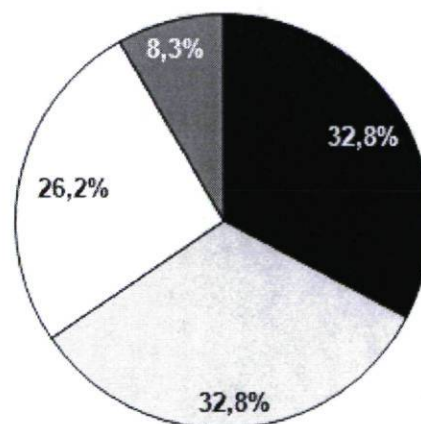
■ *F. graminearum* □ *F. sporotrichioides* □ *F. avenaceum* ■ Autres *Fusarium* spp.

Figure 12. Distribution relative de quelques espèces de *Fusarium* durant la période critique d'infection du blé et de l'orge s'étalant du 1er au 11 juillet 2007, à Saint-Augustin-de-Desmaures, selon l'orientation de la boîte de Pétri.

Boîtes de Pétri orientées vers le bas



Boîtes de Pétri orientées vers le haut



■ *F. graminearum* □ *F. sporotrichioides* □ *F. avenaceum* ■ Autres *Fusarium* spp.

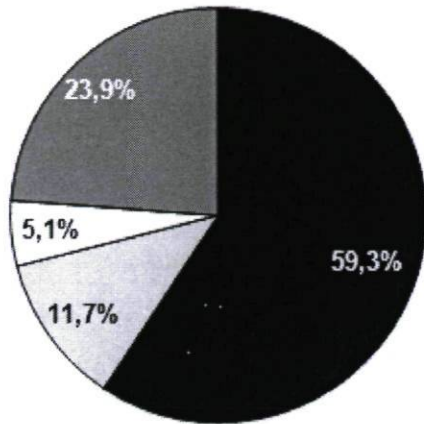
Figure 13. Distribution relative de quelques espèces de *Fusarium* durant la période critique d'infection du blé et de l'orge s'étalant du 4 au 14 juillet 2008, à Saint-Augustin-de-Desmaures, selon l'orientation de la boîte de Pétri.

À Saint-Mathieu-de-Beloeil, on constate que la distribution des principales espèces de *Fusarium* varie beaucoup par rapport à Saint-Augustin-de-Desmaures. Dans les boîtes de Pétri orientées vers le bas, *F. graminearum* domine toutes les autres espèces de *Fusarium* avec une valeur de 59,3 %. La catégorie des autres *Fusarium* suit avec une valeur tout de même assez élevée de 23,9 %. *F. sporotrichioides* et *F. avenaceum* arrivent troisième et quatrième avec 11,7 % et 5,1 %, respectivement (figure 14). La distribution relative des boîtes de Pétri orientées vers le haut suit le même ordre que celles orientées vers le bas. Cependant, *F. graminearum* est encore plus prédominant avec une valeur de 78,8 %. Les autres *Fusarium*, *F. sporotrichioides* et *F. avenaceum* suivent avec des valeurs respectives de 12,0 %, 7,7 % et 1,5 % (figure 14).

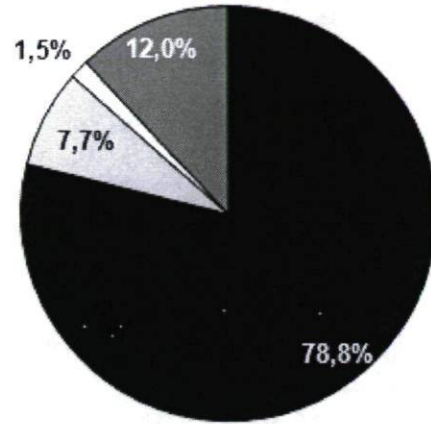
Enfin, à Saint-Mathieu-de-Beloeil en 2008, les résultats diffèrent par rapport à ceux de 2007. Dans les boîtes de Pétri orientées vers le bas, ce sont les autres *Fusarium* qui arrivent premiers en terme de prédominance avec une valeur de 39,7 %. *F. avenaceum* suit de près avec 33,2 %. *F. sporotrichioides* se classe troisième avec 17,7 %. *F. graminearum* arrive quant à lui dernier avec une valeur de 9,4 % (figure 15). Par contre, dans les boîtes de Pétri orientées vers le haut, une toute autre tendance est observée. *F. graminearum* redevient l'espèce prédominante avec une valeur de 45,1 %. Les autres *Fusarium* suivent avec 27,3 %. *F. sporotrichioides* est toujours troisième avec 22,2 % de la distribution. Enfin, *F. avenaceum* arrive bon dernier avec une faible valeur de 5,4 % (figure 15).

L'identification de toutes les espèces de *Fusarium* faite une fois par semaine durant la période d'échantillonnage de chaque année-station a permis de mesurer le nombre d'UFC produites par chacune de ces espèces pour l'ensemble de la période d'échantillonnage, selon l'orientation de la boîte de Pétri. Les données recueillies ont permis de calculer la proportion relative des espèces de *Fusarium* entre elles. Ces résultats sont présentés à l'annexe D. Une estimation du nombre d'UFC a parfois été calculée à partir du nombre d'UFC réellement identifiées d'une espèce donnée par rapport au nombre total d'UFC présentes dans la boîte de Pétri lorsque celle-ci en contenait une grande quantité.

Boîtes de Pétri orientées vers le bas



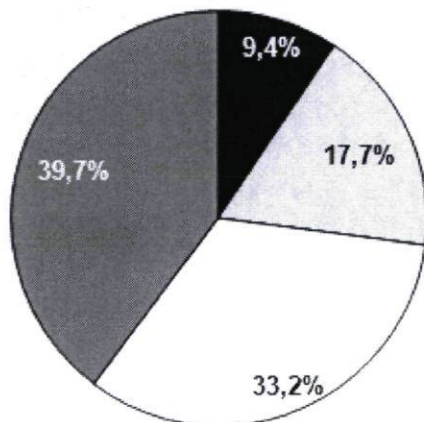
Boîtes de Pétri orientées vers le haut



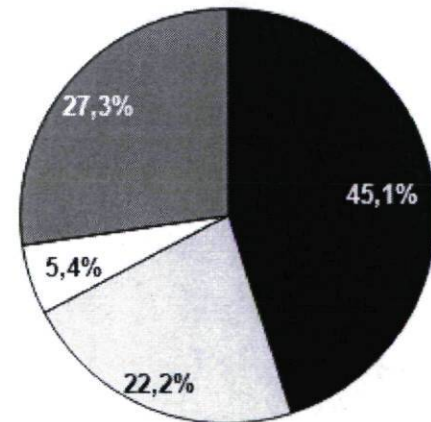
■ *F. graminearum* □ *F. sporotrichioides* □ *F. avenaceum* ■ Autres *Fusarium* spp.

Figure 14. Distribution relative de quelques espèces de *Fusarium* durant la période critique d'infection du blé et de l'orge s'étalant du 10 au 20 juillet 2007, à Saint-Mathieu-de-Beloëil, selon l'orientation de la boîte de Pétri.

Boîtes de Pétri orientées vers le bas



Boîtes de Pétri orientées vers le haut



■ *F. graminearum* □ *F. sporotrichioides* □ *F. avenaceum* ■ Autres *Fusarium* spp.

Figure 15. Distribution relative de quelques espèces de *Fusarium* durant la période critique d'infection du blé et de l'orge s'étalant du 5 au 15 juillet 2008, à Saint-Mathieu-de-Beloëil, selon l'orientation de la boîte de Pétri.

Ces résultats démontrent que la diversité des principales espèces de *Fusarium* impliquées dans la fusariose de l'épi varie entre les deux stations à l'étude et selon qu'elles sont anémophiles ou qu'elles proviennent des résidus de culture des parcelles. À Saint-Augustin-de-Desmaures, *F. avenaceum* prédomine parmi les espèces en provenance des résidus de culture de la parcelle (boîtes de Pétri orientées vers le bas). Malgré que *F. graminearum* soit l'espèce anémophile prédominante (boîtes de Pétri orientées vers le haut), *F. avenaceum* demeure une espèce d'importance. À Saint-Mathieu-de-Beloeil, *F. graminearum* représente généralement l'espèce prédominante autant en provenance des résidus de culture que de l'air. En revanche, les autres *Fusarium* occupent une place considérable dans la distribution des espèces et délogent même *F. graminearum* en 2008 pour les boîtes de Pétri orientées vers le bas. Il est également à noter que *F. avenaceum* est presque toujours l'espèce la moins fréquente avec de très faibles valeurs (%). Xu et coll. (2008a) ont déjà établi que certaines conditions climatiques particulières peuvent favoriser l'une ou l'autre des espèces de *Fusarium* responsables de la fusariose de l'épi. D'après eux, *F. avenaceum* prolifère mieux sous des conditions plus fraîches et humides, comparativement à *F. graminearum* qui évolue davantage en conditions chaudes et humides. De même, Bourdages et coll. (2006) ont observé, suite à l'isolation des *Fusarium* spp. de grains d'orge désinfectés en surface, que *F. graminearum* se retrouve davantage dans les échantillons provenant du sud du Québec, et *F. avenaceum*, dans ceux provenant de l'est du Québec. Saint-Augustin-de-Desmaures se trouve dans la région de Québec qui est située plus à l'est et qui est caractérisée par des conditions plus fraîches et humides, alors que Saint-Mathieu-de-Beloeil, localité du sud du Québec, profite de températures plus chaudes et humides. Ceci pourrait expliquer les différences dans la distribution relative des espèces de *Fusarium* retrouvées à ces deux stations.

D'autres observations peuvent être tirées des précédentes figures. Par exemple, il est surprenant de constater que *F. avenaceum* prédomine dans les boîtes de Pétri orientées vers le bas à Saint-Augustin-de-Desmaures, alors qu'il n'en est rien dans celles orientées vers le haut. Tout comme *F. graminearum*, la forme sexuée de *F. avenaceum*, *Gibberella avenacea*, produit des ascospores tout aussi susceptibles d'être transportées par le vent sur de grandes distances. Il aurait donc été normal que cette espèce représente une plus grande proportion dans les boîtes orientées vers le haut. Ceci est plutôt difficile à comprendre. Une

tentative d'explication pourrait être faite en discutant de la taille des ascospores. *Gibberella zeae*, la forme sexuée de *F. graminearum*, produit des ascospores qui mesurent de 15 à 25 µm de longueur par 3 à 5 µm de largeur (Aoki et O'Donnell, 1999), alors que celles produites par *G. avenacea* font de 12,5 à 17 µm de longueur par 4 à 5,5 µm de largeur (Booth et Spooner, 1984). Les ascospores de *G. zeae* étant plus élancées que celles de *G. avenacea*, il est envisageable qu'elles soient plus facilement transportées par le vent, ce qui pourrait expliquer les différences dans leur échantillonnage respectif. Il s'agit cependant d'une hypothèse qui ne pourrait être vérifiée qu'avec de nouvelles expérimentations.

De plus, la prévalence relative de *F. sporotrichioides* est plutôt élevée à chaque année aux deux stations, et ce, quelle que soit l'orientation de la boîte de Pétri. Pourtant, ce champignon ne produit que des conidies pluviales dispersées sur de courtes distances (Nelson et coll., 1983). Il faut cependant savoir que certaines de ces spores sont des microconidies qui ne mesurent que de 5,9 à 12 µm de longueur par 3,0 à 5,0 µm de largeur, alors que les plus grosses macroconidies peuvent mesurer de 36 à 44 µm de longueur par 3,9 à 4,5 µm de largeur (Zoffe et Palti, 1975). Il serait donc possible que ces microconidies aient été éclaboussées plus haut dans les airs, y demeurant en suspension, et qu'elles aient pu être recueillies autant par les boîtes de Pétri orientées vers le bas que vers le haut.

La présence non négligeable de *F. avenaceum* et de *F. sporotrichioides* dans l'environnement des deux régions analysées mène également à la question de la production des toxines qui leur sont associées. *F. avenaceum* produit quelques toxines, dont la moniliformine, alors que *F. sporotrichioides* est à l'origine de la T-2 et de la HT-2 (Miller, 1994), ces deux dernières étant particulièrement toxiques à de très faibles concentrations pour les animaux d'élevage comparativement au DON et à la moniliformine (Prelusky et coll., 1994). Malgré qu'elles soient moins virulentes que *F. graminearum* (Stack et McMullen, 1985; Wong et coll., 1992; Xue et coll., 2006), il est possible qu'elles parviennent à infecter les grains de blé et d'orge, et ainsi, produire leurs toxines (Rioux et coll., 2001). Il aurait été intéressant de mesurer les concentrations de ces trois autres toxines dans les grains récoltés dans le cadre de cette étude. Malheureusement, ces analyses n'ont pas été exécutées. Il pourrait être approprié, compte tenu des résultats présentés dans ce

chapitre, de s'intéresser davantage à ces toxines dans une autre étude portant sur la fusariose.

6.4 Conclusion

Les résultats rapportés dans ce chapitre ont démontré que la distribution relative et la prédominance des espèces de *Fusarium* associées à la fusariose de l'épi peuvent varier en fonction des conditions environnementales du milieu dans lequel sont faits les échantillonnages. *F. graminearum* serait l'espèce prédominante sous les conditions chaudes et humides de Saint-Mathieu-de-Beloeil, situé plus au sud du Québec, alors que *F. avenaceum* prédominerait sous le climat plus frais et humide de la région de la Capitale-Nationale, située plus à l'est du Québec. *F. avenaceum* et *F. sporotrichioides* sont relativement présents dépendamment de la station et de l'année. Malgré leur plus faible virulence, il est important de tenir compte des toxines que ces deux espèces sont susceptibles de produire dans les grains (Clear et coll., 2005), qui peuvent parfois être plus nocives que le DON produit par *F. graminearum*.

7. Discussion générale

Ce projet de maîtrise avait pour objectif général de déterminer l'effet du glyphosate sur l'intensité de la fusariose de l'épi chez le blé et l'orge sous les conditions de culture 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 d'éléments susceptibles d'influencer le comportement du glyphosate dans l'environnement, d'une part, et d'autres facteurs qui agissent sur le développement de cette maladie, d'autre part.

7.1 Effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi et la production d'inoculum de *Fusarium graminearum* selon le travail du sol

Le premier objectif spécifique de ce projet visait à déterminer l'effet du glyphosate, appliqué sur un précédent cultural de soya, sur l'intensité de la fusariose de l'épi du blé et de l'orge sous trois différents travaux du sol : travail conventionnel, travail réduit et semis direct. Les résultats obtenus ont démontré que l'application du glyphosate n'a pas influencé significativement l'indice de fusariose et le contenu en DON des grains de blé et d'orge, peu importe le travail du sol. La proportion de grains fusariés (FDK) a, quant à elle, été influencée par le traitement herbicide, mais seulement pour l'essai blé/travail conventionnel à Saint-Mathieu-de-Beloeil pour les deux années combinées. De plus, c'est l'application des autres herbicides que le glyphosate qui a mené à une valeur plus élevée de FDK. Par conséquent, notre première hypothèse mentionnant que le glyphosate augmente l'intensité de la fusariose de l'épi en travail réduit du sol et en semis direct est infirmée. Par contre, l'intensité de la fusariose n'ayant pas été augmentée en travail conventionnel, notre deuxième hypothèse est quant à elle confirmée.

Le deuxième objectif spécifique, intimement lié au premier, était d'évaluer l'effet du glyphosate sur la production d'inoculum de *F. graminearum* en provenance des résidus de culture. De toutes les analyses effectuées, seul un essai a été caractérisé par une augmentation significative de la production d'UFC de *F. graminearum* par le glyphosate, soit l'essai orge/semis direct à Saint-Mathieu-de-Beloeil pour les deux années combinées.

L'analyse statistique de l'essai blé/travail réduit de Saint-Mathieu-de-Beloeil pour les deux années combinées et de l'essai blé/travail conventionnel de Saint-Augustin-de-Desmaures en 2008 s'est également révélée significative, mais c'est le traitement non-glyphosate qui était responsable des plus grandes quantités d'UFC. Sur la base des résultats obtenus, notre troisième hypothèse voulant que l'application de glyphosate mène à une plus grande production d'inoculum de *F. graminearum* en provenance des résidus de culture est infirmée.

Quelques études *in vitro* ont été réalisées par le passé afin de comprendre l'effet direct du glyphosate sur la croissance de *F. graminearum*. Jeffery et Burgess (1990) ont démontré qu'à des concentrations représentatives de celles utilisées au champ, le glyphosate n'influence pas le taux de croissance du champignon. Cependant, d'autres études plus récentes (Hanson et Fernandez, 2002; 2003) ont établi que de nombreuses préparations commerciales de glyphosate augmentent la croissance de *F. graminearum* et de *F. avenaceum*, et que la plupart du temps, la concentration n'a que peu d'influence. Il est difficile de comparer ces résultats divergents à ceux obtenus lors de notre étude. Premièrement, les études *in vitro* ne permettent pas d'expliquer ce qui se passe en conditions réelles au champ et celles-ci devraient être interprétées avec prudence (Jeffery et Burgess, 1990). Deuxièmement, ces deux expériences ont mesuré le taux de croissance des colonies de *F. graminearum*, alors que nous avons plutôt mesuré les quantités d'UFC produites par ce champignon en provenance des résidus de culture. Malgré qu'il soit logique de croire qu'une plus forte croissance de *F. graminearum* devrait entraîner une plus grande production d'inoculum, ceci n'a pas été prouvé ni par les études *in vitro* présentées précédemment, ni par nos travaux. Les travaux de Jeffery et Burgess (1990) et de Hanson et Fernandez (2002, 2003) ne nous permettent donc pas d'expliquer nos résultats.

En revanche, les études au champ sont tout aussi contradictoires que celles réalisées *in vitro*. Les travaux d'Henriksen et Elen (2005) avaient démontré que l'application de glyphosate l'année précédant la culture de l'avoine n'augmentait pas la proportion de grains infectés par la fusariose, ce qui concorde avec nos propres résultats. Par ailleurs, les enquêtes de Fernandez et coll. (2005, 2007) ont établi que l'utilisation de glyphosate dans les 18 mois précédant la culture de blé ou d'orge était associée positivement à l'indice de

fusariose et à la proportion de grains infectés, particulièrement lorsque combinée au travail réduit du sol. Enfin, au contraire de ces derniers, Hansen et coll. (2004) ont accidentellement remarqué qu'une dérive de glyphosate avait diminué l'intensité de la fusariose sur les épis de blé de printemps et de blé dur provenant de la bande la plus près de la dérive. Il serait cependant nécessaire de valider ces derniers résultats en reprenant l'expérience en conditions expérimentales contrôlées.

Quoi qu'il en soit, en raison des études plutôt divergentes sur le sujet et en l'absence de dosage du glyphosate dans la présente étude, il serait approprié de commencer par se questionner sur la présence réelle de glyphosate dans les résidus de culture. Plusieurs facteurs sont susceptibles d'avoir influencé la quantité finale de glyphosate retrouvée sur les résidus de soya l'année de la culture du blé et de l'orge. Par exemple, une application de glyphosate sur le soya suivie d'un épisode de pluie peut limiter l'absorption de l'herbicide par la plante en le lessivant (Cessna et coll., 1994), diminuant ainsi la quantité de glyphosate présente dans les résidus de culture. Toutefois, la préparation commerciale utilisée dans notre projet était le *Roundup Weathermax*TM, qui résiste au lessivage une heure seulement après l'application (MAAARO, 2008). Ces conditions ayant été respectées, le soya a certainement eu le temps d'absorber le glyphosate.

Par contre, même s'il y a eu absorption du glyphosate par les plantes de soya, rien ne prouve que l'herbicide était encore présent quelques temps après l'application. En Argentine, Arregui et coll. (2003) étaient parvenus à démontrer que des plantes de soya *Roundup Ready*TM ayant reçu du glyphosate contenaient moins de 6 ppm de l'herbicide et ses métabolites au moment de la récolte, soit quelques mois après l'application. De plus, les quantités les plus élevées ont été obtenues avec deux applications de glyphosate dans la saison. Compte tenu qu'une seule application de glyphosate a été faite dans notre expérience, il est envisageable que dès l'année de l'application, les teneurs en glyphosate étaient déjà faibles dans les plantes de soya. Par la suite, le soya était récolté et les résidus de culture étaient hachés et laissés à la surface du sol jusqu'à la saison suivante. Ceux-ci étaient donc exposés aux précipitations de pluie et de neige qui sont particulièrement fréquentes au Québec. Le glyphosate étant très soluble, il est fort probable qu'il ait été lessivé des résidus de culture (Cessna et Waddington, 1995).

En supposant que le glyphosate était encore présent en quantité suffisante sur les résidus de culture, il serait important de mieux comprendre le rôle que jouent les champignons du genre *Fusarium* associés à la fusariose de l'épi dans la décomposition microbienne de l'herbicide. D'après Krzyśko-Łupicka et Orlik (1997), les champignons du genre *Fusarium* participent de façon marquée à la dégradation du glyphosate. En revanche, la plupart du temps, il s'agit surtout d'espèces de *Fusarium* qui ne causent pas la fusariose de l'épi, telles que *F. oxysporum* (Castro Jr et coll., 2007). Dans l'éventualité que les espèces de *Fusarium* responsables de la fusariose participent à la dégradation du glyphosate, il faudrait aussi établir si elles utilisent ou non le glyphosate comme source de nutriments. Il serait également pertinent de se préoccuper des relations complexes susceptibles de s'établir entre le glyphosate, les espèces de *Fusarium* associées à la maladie et le reste de la communauté microbienne. Les études *in vitro* résumées précédemment (Hanson et Fernandez, 2002; 2003; Jeffery et Burgess, 1990) démontrent l'effet du glyphosate sur des souches pures de *F. graminearum* et *F. avenaceum* en conditions contrôlées, mais ne tiennent pas compte des effets symbiotiques ou antagonistes possibles des autres micro-organismes normalement présents dans la litière ou les résidus végétaux. Wardle et Parkinson (1992) ont même prouvé que les interactions compétitives entre certaines espèces de champignons du sol varient selon la concentration de glyphosate. Ces interactions mériteraient d'être approfondies afin de tenter de mieux comprendre le mode d'action du glyphosate sur les espèces de *Fusarium* impliquées dans la fusariose de l'épi.

Les propriétés du sol sur lequel se retrouvent les cultures de blé et d'orge pourraient également contribuer à faire varier l'effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi. En effet, il est reconnu depuis longtemps que le glyphosate est rapidement adsorbé par les minéraux argileux et par la matière organique du sol (Sprankle et coll., 1975). Le glyphosate exsudé par les racines de soya ou tombé accidentellement au sol sans atteindre la plante risque donc d'être adsorbé rapidement et fortement dans des sols riches en ces deux constituants, et ainsi, d'être plus accessible aux décomposeurs microbiens. En contrepartie, comme les mécanismes d'adsorption du glyphosate impliquent les groupements phosphatés de celui-ci, il entre en compétition avec le phosphore inorganique du sol pour les sites d'adsorption (Gimsing et Borggaard, 2002). Les sols riches en cet élément risquent donc de causer un lessivage plus prononcé du glyphosate, limitant ainsi sa décomposition microbienne. Les

sols utilisés dans le cadre de notre projet de recherche possédaient tous une teneur moyenne à élevée en matière organique et une teneur moyenne en phosphore, alors que seuls les sols de Saint-Mathieu-de-Beloel étaient très riches en argile. Somme toute, il s'agit de caractéristiques qui sont propices à une bonne adsorption du glyphosate et qui auraient peut-être pu contribuer à accélérer la dégradation de l'herbicide par les micro-organismes du sol, limitant ainsi sa présence l'année suivant son application. Des études plus poussées seraient cependant requises pour valider ce genre d'hypothèses.

Une autre propriété du sol susceptible d'interagir avec le glyphosate serait la teneur en manganèse. C'est ce qu'avancent Johal et Huber (2009) dans une récente revue de littérature visant à faire la lumière sur les effets répertoriés du glyphosate sur l'augmentation de l'intensité de certaines maladies comme la fusariose. Le glyphosate, comme tous les acides phosphorés, est reconnu comme étant un agent chélateur de nombreux ions métalliques (Cole, 1985), dont le manganèse. Or, celui-ci est un co-facteur de l'enzyme 5-énolpyruvylshikimate acide-3-phosphate synthase (EPSPS) de la voie shikimique qui est impliquée non seulement dans la synthèse des acides aminés aromatiques, mais également dans le déclenchement de nombreux mécanismes de défense des plantes aux agents pathogènes (Johal et Huber, 2009). Lorsqu'un chélat entre le glyphosate et le manganèse est formé, ce dernier n'est plus disponible pour la plante. Ainsi, dans un sol pauvre en manganèse, l'immobilisation de ce micro-élément pourrait entraîner une carence en cet élément et une diminution de la résistance de la plante aux maladies, dont la fusariose (Johal et Huber, 2009). Les sols sur lesquels notre expérience a été menée étaient tous plutôt riches en cet élément (de 20,8 à 27,6 ppm à Saint-Augustin-de-Desmaures et de 11,8 à 22,7 ppm à Saint-Mathieu-de-Beloel), ce qui pourrait peut-être expliquer l'absence d'effet du glyphosate sur la fusariose de l'épi. Il serait toutefois nécessaire de procéder à de nouvelles expérimentations incluant des sites n'ayant pas reçu de glyphosate depuis quelques années et où les sols ont des teneurs en manganèse différentes et variées. Il faudrait également approfondir notre compréhension des mécanismes qui régissent les interactions entre le glyphosate et le manganèse.

En terminant cette section, mentionnons que le glyphosate pourrait aussi agir de manière plus indirecte sur les maladies par le biais des mauvaises herbes. Par exemple, les

mauvaises herbes éliminées par un traitement de glyphosate pourraient servir de substrat pour la croissance des *Fusarium* spp. impliqués dans la fusariose de l'épi. Certaines mauvaises herbes produisant des substances allélopathiques comme le chiendent pourraient également nuire à la croissance des céréales en libérant ces composés toxiques par lessivage à l'eau (Lynch et Penn, 1980; Penn et Lynch, 1981). Il a même été démontré que des mauvaises herbes ayant reçu du glyphosate étaient davantage colonisées par *Fusarium* spp., dont *F. avenaceum*, espèce impliquée dans la fusariose de l'épi (Lévesque et coll., 1987). Malheureusement, l'évaluation du couvert de mauvaises herbes avant et après l'application du glyphosate dans le soya n'a pas été faite dans cette étude. Il serait donc difficile d'établir si celles-ci ont eu un effet ou non. Néanmoins, il s'agit d'un autre aspect qui mériterait d'être approfondi pour mieux comprendre les mécanismes inhérents aux interactions possibles entre le glyphosate et la fusariose de l'épi.

7.2 Autres facteurs reliés au développement de la fusariose de l'épi

Le troisième objectif spécifique du projet consistait à caractériser la quantité d'inoculum de *F. graminearum* provenant autant des résidus de culture que de l'air au-dessus de la parcelle en travail conventionnel, en travail réduit du sol et en semis direct sous les conditions climatiques de deux régions du Québec. Il s'est avéré que l'inoculum aérien au-dessus de la parcelle était beaucoup plus élevé que celui en provenance des résidus de culture de la parcelle, et ce, quels que soient le travail du sol et la région étudiée.

Ces résultats peuvent être expliqués de différentes façons. Dans notre projet, le précédent cultural utilisé était le soya, considéré comme une plante non-hôte à la fusariose. Malgré que les résidus de soya puissent supporter une certaine croissance de *F. graminearum* (Baird et coll., 1997), il a été démontré qu'elle était bien moindre à celle mesurée sur des résidus de cultures hôtes telles que le maïs (Dill-Macky et Jones, 2000; Miller et coll., 1998). Comme les parcelles contenaient justement des résidus de soya, il est normal que les quantités mesurées de *F. graminearum* en provenance de ceux-ci étaient faibles. Les résultats auraient sans doute été bien différents si une culture hôte avait été utilisée comme précédent cultural (Francl et coll., 1999). Ces résultats font également ressortir l'importance

des rotations à l'échelle régionale. On a en effet pu observer que les quantités d'inoculum aérien au-dessus de la parcelle étaient toujours supérieures à Saint-Mathieu-de-Beloeil comparativement à Saint-Augustin-de-Desmaures. Or, en Montérégie, région où se situe la localité de Saint-Mathieu-de-Beloeil, la culture du maïs est prédominante. Une grande quantité de résidus de culture pouvant être infectés par *F. graminearum* est donc produite, permettant ainsi une forte production d'inoculum susceptible d'atteindre les cultures hôtes environnantes. La contribution des résidus de culture présents dans les champs avoisinants a déjà été démontrée (Del Ponte et coll., 2003; Maldonado-Ramirez et coll., 2005; Schmale III et coll., 2005).

La relation existant entre la quantité d'inoculum en provenance des résidus de culture de la parcelle ou de l'air au-dessus de celle-ci et le contenu en DON des grains n'a pas été aussi convaincante que ce qui avait été supposé par nos quatrième et cinquième hypothèses. Le coefficient de régression, quoique positif, était très faible dans tous les cas sauf pour la relation entre la quantité d'inoculum aérien au-dessus de la parcelle et le contenu en DON des grains de blé, où il était moyennement élevé. La faible relation entre la quantité d'inoculum en provenance des résidus de culture de la parcelle et le contenu en DON des grains de blé et d'orge apporte une explication supplémentaire à l'absence d'effet du glyphosate dans ce projet. En effet, nous avons supposé que le glyphosate, en demeurant sur les résidus de culture, permettrait une augmentation de la croissance et de la sporulation de *F. graminearum*. Cependant, il semble, d'après nos résultats, que cet inoculum ne soit pas le seul facteur impliqué dans le développement de la fusariose de l'épi et la production subséquente de DON. Par conséquent, même si le glyphosate avait effectivement influencé à la hausse la sporulation de *F. graminearum*, rien ne prouve que l'intensité de la fusariose aurait été plus forte. Quant aux relations également plutôt faibles entre l'inoculum aérien au-dessus de la parcelle et le contenu en DON des grains, ceci démontre que d'autres facteurs influencent de manière plus importante le développement de la fusariose de l'épi.

Le quatrième et dernier objectif spécifique du projet était de déterminer la distribution relative et la prédominance des différentes espèces de *Fusarium* associées à la fusariose de l'épi de deux régions du Québec. Nos résultats ont démontré que les climats différents de ces deux régions semblent influencer de manière non négligeable le comportement des

espèces de *Fusarium* impliquées dans la fusariose de l'épi. En général, *F. graminearum* prédominait dans la région de Saint-Mathieu-de-Beloeil, alors que *F. avenaceum* prévalait dans la région de Saint-Augustin-de-Desmaures. Sans sous-estimer l'impact de la culture du maïs en Montérégie, il a déjà été démontré que *F. graminearum* prédomine davantage dans les régions caractérisées par des conditions plus chaudes et humides, comme à Saint-Mathieu-de-Beloeil, alors que *F. avenaceum* prime dans les régions où les conditions climatiques sont plus fraîches et humides, comme à Saint-Augustin-de-Desmaures (Bourdages et coll., 2006; Xu et coll., 2008a), où le maïs-grain est moins présent. Il serait alors intéressant de vérifier si le contenu en DON des grains est plus élevé dans une région où *F. graminearum* est prédominant comparativement à une autre région où une autre espèce non productrice de DON, comme *F. avenaceum*, prévaut davantage. Toutefois, tout comme la relation entre l'inoculum de *F. graminearum* et le contenu en DON mesuré dans les grains, il est probable que la seule présence de l'espèce appropriée soit insuffisante à expliquer le développement de la maladie et la production de mycotoxines.

Les conditions météorologiques prévalant durant la période critique d'infection sont reconnues depuis longtemps pour influencer le développement de la fusariose de l'épi et leur effet a pu être observé dans notre projet. Ces conditions sont des températures se situant entre 20 et 30 °C et une présence d'humidité sur les épis se prolongeant pour une période de 48 à 60 heures (Sutton, 1982). Lorsqu'elles sont réunies, les céréales risquent davantage d'être infectées par *F. graminearum*, qui a ainsi plus de chances de produire du DON. Ainsi, même si les conditions climatiques sont historiquement plus favorables à l'infection des céréales par *F. graminearum* dans une région comme celle de Saint-Mathieu-de-Beloeil, ce sont les conditions prévalant au moment de la période critique qui font toute la différence, permettant ainsi à l'infection de se produire dans des régions comme celle de Saint-Augustin-de-Desmaures.

Enfin, la sensibilité du cultivar demeure sans contredire l'un des facteurs qui influence le plus l'intensité de la fusariose de l'épi. Dans la quasi-totalité de nos expériences, cet effet s'est révélé hautement significatif et les résultats concordaient avec les cotes de sensibilité établies. Avec la rotation, il s'agit d'un des meilleurs moyens disponibles pour limiter le

développement de la fusariose de l'épi. Ceci explique pourquoi beaucoup d'énergie est et continuera d'être investie dans l'amélioration génétique des cultivars de blé et d'orge.

8. Conclusion générale

Les résultats de ce projet de recherche ont démontré que le glyphosate n'a généralement pas d'effet significatif sur l'intensité de la fusariose de l'épi et sur la sporulation de *F. graminearum* sous les conditions de culture du Québec, et ce, peu importe le travail du sol. Il y a fort à parier que l'herbicide n'est plus présent en quantité suffisante dans les résidus de culture pour potentiellement contribuer à l'augmentation de la production d'inoculum de *F. graminearum*, principalement en raison du lessivage entraîné par les précipitations abondantes caractéristiques du climat du Québec. De plus, de nombreux autres facteurs reconnus depuis longtemps pour influencer l'intensité de la maladie ont sans aucun doute prédominé par rapport à l'effet du glyphosate. Parmi ces facteurs, mentionnons les conditions climatiques prévalant durant la période critique d'infection, les rotations incluant des cultures hôtes ou non-hôtes et la sensibilité des cultivars. D'ailleurs, ces deux derniers éléments comptent parmi les meilleurs moyens pour tenter de diminuer les impacts négatifs de la fusariose de l'épi sur le rendement des cultures de blé et d'orge.

Par ailleurs, même si le glyphosate n'a pas semblé influencer à la hausse la fusariose de l'épi sous les conditions climatiques du Québec, il n'en est pas nécessairement de même ailleurs dans le monde. En effet, il semble que cet herbicide ait réellement augmenté la gravité de la maladie dans l'Ouest canadien. De plus, le glyphosate augmenterait également l'intensité de plusieurs autres maladies, dont le piétin-échaudage du blé et le syndrome de la mort subite du soya (Johal et Huber, 2009). Tout ceci devient plus inquiétant encore lorsque l'on considère l'ampleur des superficies ensemencées avec des cultures transgéniques résistantes au glyphosate, qui ne cessent de s'accroître d'année en année sur toute la planète. Il est pertinent de supposer que la proportion de cet herbicide retrouvée dans l'environnement ira également en augmentant avec les années. Il est donc important, d'une part, de poursuivre la recherche sur ce sujet afin de mieux comprendre les mécanismes qui régissent l'effet du glyphosate sur ces différentes maladies et, d'autre part, d'utiliser ces nouvelles connaissances afin de limiter les dégâts faits aux cultures concernées, sans toutefois oublier de proposer d'autres moyens efficaces aux producteurs agricoles pour la lutte contre les mauvaises herbes.

Bibliographie

- Aoki, T. et O'Donnell, K. 1999. Morphological characterization of *Gibberella coronicola* sp. nov., obtained through mating experiments of *Fusarium pseudograminearum*. *Mycosci.* 40 : 443-453.
- ApSimon, J.W. 1994. The biosynthetic diversity of secondary metabolites. *Dans* Mycotoxins in grain : Compounds other than aflatoxin. *Sous la direction de* J.D. Miller et H.L. Trenholm. Eagan Press, St.Paul. p. 3-18.
- Araújo, A.S.F., Monteiro, R.T.R. et Abarkeli, R.B. 2003. Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils. *Chemosphere* 52 : 799-804.
- Arregui, M.C., Lenardón, A., Sanchez, D., Maitre, M.I., Scotta, R. et Enrique, S. 2003. Monitoring glyphosate residues in transgenic glyphosate-resistant soybean. *Pest Manag. Sci.* 60 : 163-166.
- Bai, G. et Shaner, G. 1994. Scab of wheat : prospects for control. *Plant Dis.* 78 : 760-766.
- Bailey, K.L., Couture, L., Gossen, B.D., Gugel, R.K. et 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. et Lang, M.L. 1997. Diversity and longevity of the soybean debris mycobiota in a no-tillage system. *Plant Dis.* 81 : 530-534.
- Booth, C. et Spooner, B.M. 1984. *Gibberella avenacea*, teleomorph of *Fusarium avenaceum*, from stems of *Pteridium aquilinum*. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 82 : 178-180.
- Bottalico, A. et Perrone, G. 2002. Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with head blight in small-grain cereals in Europe. *Eur. J. Plant Pathol.* 108 : 611-624.
- Bourdages, J.V., Marchand, S., Rioux, S. et Belzile, F.J. 2006. Diversity and prevalence of *Fusarium* species from Quebec barley fields. *Can. J. Plant Pathol.* 28 : 419-425.
- Canada's National Climate Archive. 2008. Canadian Climate Normals or Averages 1971-2000 [online]. Environment Canada. Available at http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals/index_e.html [cité le 14 janvier 2010].
- Castro, Jr, J.V., Peralba, M.C.R. et Ayub, M.A.Z. 2007. Biodegradation of the herbicide glyphosate by filamentous fungi in platform shaker and batch bioreactor. *J. Environ. Sci. Health Pt B Pestic. Food Contam. Agric. Wastes* 42 : 883-886.

- Centre de recherche sur les grains (CEROM). 2007. Résultats des essais de maïs-grain et de cultivars de plantes oléoprotéagineuses 2006 et recommandations de cultivars de céréales 2007. Saint-Bruno-de-Montarville, QC. 63 p.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2003. Guide de référence en fertilisation. Sainte-Foy, QC. 294 p.
- Cessna, A.J., Darwent, A.L., Kirkland, K.J., Townley-Smith, L., Harker, K.N. et Lefkovitch, L.P. 1994. Residues of glyphosate and its metabolite AMPA in wheat seed and foliage following preharvest applications. *Can. J. Plant Sci.* 74 : 653-661.
- Cessna, A.J. et Waddington, J. 1995. Dissipation of glyphosate and its metabolite AMPA in established crested wheatgrass following spring application. *Can. J. Plant Sci.* 75 : 759-762.
- Champeil, A., Doré, T. et Fourbet, J.F. 2004a. 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 Sci.* 166 : 1389-1415.
- Champeil, A., Fourbet, J.F., Doré, T. et Rossignol, L. 2004b. Influence of cropping system on fusarium head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Prot.* 23 : 531-537.
- Charmley, L.L. et Trenholm, H.L. 2009. Fiche de renseignements – Les mycotoxines [en ligne]. Agence canadienne d'inspection des aliments. Disponible à <http://www.inspection.gc.ca/francais/anima/feebet/pol/mycof.shtml> [cité le 10 février 2010].
- Clear, R.M. et Abramson, D. 1986. Occurrence of fusarium head blight and deoxynivalenol (vomitoxin) in two samples of Manitoba wheat in 1984. *Can. Plant Dis. Surv.* 66 : 9-11.
- Clear, R.M., Patrick, S.K. et Gaba, D. 2000. Prevalence of fungi and fusariotoxins on barley seed from western Canada, 1995 to 1997. *Can. J. Plant Pathol.* 22 : 44-50.
- Clear, R.M., Patrick, S.K., Gaba, D., Abramson, D. et Smith, D.M. 2005. Prevalence of fungi and fusariotoxins on hard red spring and amber durum wheat seed from western Canada, 2000 to 2002. *Can. J. Plant Pathol.* 27 : 528-540.
- Cole, D.J. 1985. Mode of action of glyphosate – a literature analysis. *Dans* The herbicide glyphosate. *Sous la direction de* E. Grossbard et D. Atkinson. Butterworths, Londres. p. 48-74.
- Commission canadienne des grains (CCG). 2008. Seuils de tolérances des grades s'appliquant aux grains fusariés et limites recommandées pour le DON [en ligne]. Disponible à <http://grainscanada.gc.ca/guides-guides/don/don-1-fra.htm#1a> [cité le 23 décembre 2009].

- Conseil des productions végétales du Québec inc. (CPVQ). 2000a. Le travail conventionnel. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures, Feuille 2-A. 16 p.
- Conseil des productions végétales du Québec inc. (CPVQ). 2000b. Le travail réduit. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures, Feuille 2-B. 15 p.
- Conseil des productions végétales du Québec inc. (CPVQ). 2000c. Le semis direct. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures, Feuille 2-C. 17 p.
- Conseil des productions végétales du Québec inc. (CPVQ). 2000d. Impacts sur la couverture de résidus. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures, Feuille 2-E. 8 p.
- Del Ponte, E.M., Shah, D.A. et Bergstrom, G.C. 2003. Spatial patterns of fusarium head blight in New York wheat fields suggest role of airborne inoculum [en ligne]. Plant Health Progress doi : 10.1094/PHP-2003-0418-01-RS.
- Dill-Macky, R. et Jones, R.K. 2000. The effect of previous crop residues and tillage on fusarium head blight of wheat. Plant Dis. 84 : 71-76.
- Doohan, F.M., Brennan, J. et Cooke, B.M. 2003. Influence of climatic factors on *Fusarium* species pathogenic to cereals. Eur. J. Plant Pathol. 109 : 755-768.
- Fauzi, M.T. 1992. The effects of growth regulators and nitrogen on fusarium head blight of wheat. M.Sc. thesis, Department of Plant Science, McGill University, Montreal, Quebec.
- Fernandez, M.R., Selles, F., Gehl, D., DePauw, R.M. et Zentner, R.P. 2005. Crop production factors associated with fusarium head blight in spring wheat in eastern Saskatchewan. Crop Sci. 45 : 1908-1916.
- Fernandez, M.R., Zentner, R.P., DePauw, R.M., Gehl, D. et Stevenson, F.C. 2007. Impacts of crop production factors on fusarium head blight in barley in eastern Saskatchewan. Crop Sci. 47 : 1574-1584.
- Fernando, W.G.D., Paulitz, T.C., Seaman, W.L., Dutilleul, P. et Miller, J.D. 1997. Head blight gradients caused by *Gibberella zeae* from area sources of inoculum in wheat field plots. Phytopathology 87 : 414-421.
- Fernando, W.G.D., Miller, J.D., Seaman, W.L., Seifert, K. et Paulitz, T.C. 2000. Daily and seasonal dynamics of airborne spores of *Fusarium graminearum* and other *Fusarium* species sampled over wheat plots. Can. J. Bot. 78 : 497-505.
- Francl, L., Shaner, G., Bergstrom, G., Gilbert, J., Pedersen, W., Dill-Macky, R., Sweets, L., Corwin, B., Jin, Y., Gallenberg, D. et Wiersma, J. 1999. Daily inoculum levels of *Gibberella zeae* on wheat spikes. Plant Dis. 83 : 662-666.

- Franz, J.E. 1985. Discovery, development and chemistry of glyphosate. *Dans The herbicide glyphosate. Sous la direction de E. Grossbard et D. Atkinson.* Butterworths, Londres. p. 3-17.
- Gilbert, G., Bernier, D. et Lacroix, C. 2006. Un vieux problème chez le fraisier enfin solutionné! [en ligne]. Laboratoire de diagnostic en phytoprotection, MAPAQ. Disponible à <http://www.agrireseau.qc.ca/references/13/Un%20vieux%20probl%e3%a8me%20de%20fraisier.pdf> [cité le 7 janvier 2010].
- Gilbert, J. et Tekauz, A. 2000. Review : Recent developments in research on fusarium head blight of wheat in Canada. *Can. J. Plant Pathol.* 22 : 1-8.
- Gimsing, A.L. et Borggaard, O.K. 2002. Competitive adsorption and desorption of glyphosate and phosphate on clay silicates and oxides. *Clay Miner.* 37 : 509-515.
- Glass, R.L. 1987. Adsorption of glyphosate by soils and clay minerals. *J. Agric. Food Chem.* 35 : 497-500.
- Grossbard, E. 1985. Effects of glyphosate on the microflora : with reference to the decomposition of treated vegetation and interaction with some plant pathogens. *Dans The herbicide glyphosate. Sous la direction de E. Grossbard et D. Atkinson.* Butterworths, Londres. p. 159-185.
- Hansen, J.M., Stack, R.W., Elisa, E. et Mergoum, M. 2004. Effect of application of a sublethal dosage of glyphosate on FHB severity in spring wheat and durum. *Dans The 2nd international symposium on fusarium head blight. Sous la direction de S.M. Canty, T. Boring, K. Versdahl, J. Wardwell et R.W. Ward.* Michigan State University, Lansing. p. 311-314.
- Hanson, K.G. et Fernandez, M.R. 2002. In-vitro growth of fusarium head blight fungi as affected by glyphosate-based herbicides. *Can. J. Plant Pathol.* 24 : 387 (résumé).
- Hanson, K.G. et Fernandez, M.R. 2003. Glyphosate herbicides affect plant pathogenic fungi. *Can. J. Plant Pathol.* 25 : 120 (résumé).
- Henriksen, B. et Elen, O. 2005. Natural *Fusarium* grain infection level in wheat, barley and oat after early application of fungicides and herbicides. *J. Phytopathol.* 153 : 214-220.
- Inch, S., Fernando, W.G.D. et Gilbert, J. 2005. Seasonal and daily variation in the airborne concentration of *Gibberella zeae* (Schw.) Petch spores in Manitoba. *Can. J. Plant Pathol.* 27 : 357-363.
- Inch, S.A. et Gilbert, J. 2003. Survival of *Gibberella zeae* in *Fusarium*-damaged wheat kernels. *Plant Dis.* 87 : 282-287.

- Jeffery, S. et Burgess, L.W. 1990. Growth of *Fusarium graminearum* Schwabe Group 1 on media amended with atrazine, chlorsulfuron or glyphosate in relation to temperature and osmotic potential. *Soil Biol. Biochem.* 22 : 665-670.
- Johal, G.S. et Huber, D.M. 2009. Glyphosate effects on diseases of plants. *Eur. J. Agron.* 31 : 144-152.
- Koch, H.J., Pringas, C. et Maerlaender, B. 2006. Evaluation of environmental and management effects on fusarium head blight infection and deoxynivalenol concentration in the grain of winter wheat. *Eur. J. Agron.* 24 : 357-366.
- Khonga, E.B. et Sutton, J.C. 1988. Inoculum production and survival of *Gibberella zeae* in maize and wheat residues. *Can. J. Plant Pathol.* 10 : 232-239.
- Krzyśko-Łupicka, T. et Orlik, A. 1997. The use of glyphosate as the sole source of phosphorus or carbon for the selection of soil-borne fungal-strains capable to degrade this herbicide. *Chemosphere* 34 : 2601-2605.
- Krzyśko-Łupicka, T. et Sudol, T. 2008. Interactions between glyphosate and autochthonous soil fungi surviving in aqueous solution of glyphosate. *Chemosphere* 71 : 1386-1391.
- Lévesque, C.A., Rahe, J.E. et Eaves, D.M. 1987. Effects of glyphosate on *Fusarium* spp. : its influence on root colonization of weeds, propagule density in the soil, and crop emergence. *Can. J. Microbiol.* 33 : 354-360.
- Lynch J.M. et Penn, D.J. 1980. Damage to cereals caused by decaying weed residues. *J. Sci. Food Agric.* 31 : 321-324.
- Madden, L.V. et Paul, P.A. 2009. Assessing heterogeneity in the relationship between wheat yields and fusarium head blight intensity using random-coefficient mixed models. *Phytopathology* 99 : 850-860.
- Maldonado-Ramirez, S.L., Schmale III, D.G., Shields, E.J. et Bergstrom, G.C. 2005. The relative abundance of viable spores of *Gibberella zeae* in the planetary boundary layer suggests the role of long-distance transport in regional epidemics of fusarium head blight. *Agric. For. Meteorol.* 132 : 20-27.
- Martin, R.A. 1988. Use of a high-through-put jet sampler for monitoring viable airborne propagules of *Fusarium* in wheat. *Can. J. Plant Pathol.* 10 : 359-360.
- McMullen, M., Jones, R. et Gallenberg, D. 1997. Scab of wheat and barley : a re-emerging disease of devastating impact. *Plant Dis.* 81 : 1340-1348.
- Mensink, H. et Janssen, P. 1994. Environmental health criteria 159 - Glyphosate. International programme on chemical safety, World health organization, Genève. 177 p.

- Miano, T.M., Piccolo, A., Celano, G. et Senesi, N. 1992. Infrared and fluorescence spectroscopy of glyphosate-humic acid complexes. *Sci. Tot. Environ.* 123/124 : 83-92.
- Miller, J.D. 1994. Epidemiology of *Fusarium* ear diseases of cereals. *Dans Mycotoxins in grain : Compounds other than aflatoxin. Sous la direction de J.D. Miller et H.L. Trenholm.* Eagan Press, St.Paul. p. 19-36.
- Miller, J.D., Culley, J., Fraser, K., Hubbard, S., Meloche, F., Ouellet, T., Seaman, W.L., Seifert, K.A., Turkington, K. et Voldeng, H. 1998. Effect of tillage practice on fusarium head blight of wheat. *Can. J. Plant Pathol.* 20 : 95-103.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), 2008. Guide de lutte contre les mauvaises herbes 2008-2009. Publication 75F. Ontario MAAARO, Toronto, Ont., 428 p.
- Morillo E., Undabeytia, T., Maqueda, C. et Ramos, A. 2000. Glyphosate adsorption on soils of different characteristics – Influence of copper addition. *Chemosphere* 40 : 103-107.
- Nelson, P. E., Toussoun, T. A., et Marasas, W. F. O. 1983. *Fusarium* species: An illustrated manual for identification. Pennsylvania State University Press, University Park. 193 p.
- Pageau, D., Lajeunesse, J. et Savard, M. 2005. DON content in a long-term barley monoculture system : Effect of tillage practices. *Can. J. Plant Sci.* 85 : 190.
- Pageau, D., Filion, P., Lafond, J., Lajeunesse, J., Savard, M., Rioux, S. et Tremblay, G. 2009. Fusariose : réduire les risques au champ! Journée d'information sur les mycotoxines, CRAAQ, Drummondville, 1^{er} décembre.
- Papavizas, G.C. 1967. Evaluation of various media and antimicrobial agents for isolation of *Fusarium* from soil. *Phytopathology* 57 : 848-852.
- Paulitz, T.C. 1996. Diurnal release of ascospores by *Gibberella zeae* in inoculated wheat plots. *Plant Dis.* 80 : 674-678.
- Penn, D.J. et Lynch, J.M. 1981. Effect of decaying couch grass rhizomes on the growth of barley. *J. Appl. Ecol.* 18 : 669-674.
- Pereyra, S.A., Dill-Macky, R. et Sims, A.L. 2004. Survival and inoculum production of *Gibberella zeae* in wheat residue. *Plant Dis.* 88 : 724-730.
- Piccolo, A., Celano, G. et Pietramellara, G. 1992. Adsorption of the herbicide glyphosate on a metal-humic acid complex. *Sci. Tot. Environ.* 123/124 : 77-82.

- Piccolo, A., Celano, G., Arienzo, M. et Mirabella, A. 1994. Adsorption and desorption of glyphosate in some European soils. *J. Environ. Sci. Health* 29 : 1105-1115.
- Piccolo, A., Celano, G. et Conte, P. 1996. Adsorption of glyphosate by humic substances. *J. Agric. Food Chem.* 44 : 2442-2446.
- Powell, J.R. et Swanton, C.J. 2008. A critique of studies evaluating glyphosate effects on diseases associated with *Fusarium* spp. *Weed Res.* 48 : 307-318.
- Prelusky, D.B., Rotter, B.A. et Rotter, R.G. 1994. Toxicology of mycotoxins. *Dans Mycotoxins in grain : Compounds other than aflatoxin. Sous la direction de J.D. Miller et H.L. Trenholm.* Eagan Press, St.Paul. p. 359-404.
- Rioux, S., Bourgeois, G. et Dion, Y. 2001. Fusarium head blight on barley and wheat in Quebec in 1999 and 2000. Canadian Workshop on Fusarium Head Blight / Colloque Canadien sur la Fusariose, Ottawa. 3-5 novembre : 133. (*Résumé*)
- Rioux, S., Pageau, D., Lajeunesse, J., Lafond, J. et 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.
- Rossi, V., Languasco, L., Patteri, E. et Giosuè, S. 2002. Dynamics of airborne *Fusarium* macroconidia in wheat fields naturally affected by head blight. *J. Plant Pathol.* 84 : 53-64.
- Rueppel, M.L., Brightwell, B.B., Schaefer, J. et Marvel, J.T. 1977. Metabolism and degradation of glyphosate in soil and water. *J. Agric. Food Chem.* 25 : 517-528.
- Schaafsma, A.W., Tamburic-Ilincic, L. et 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. *Can. J. Plant Pathol.* 27 : 217-224.
- Schaafsma, A.W., Tamburic-Ilincic, L., Miller, J.D. et Hooker, D.C. 2001. Agronomic considerations for reducing deoxynivalenol in wheat grain. *Can. J. Plant Pathol.* 23 : 279-285.
- Schisler, D.A., Khan, N.I., Boehm, M.J., Lipps, P.E., Slininger, P.J. et Zhang, S. 2006. Selection and evaluation of the potential of choline-metabolizing microbial strains to reduce fusarium head blight. *Biol. Control.* 39 : 497-506.
- Schlang, N., Steiner, U., Dehne, H.-W., Murakami, J., Duveiller, E. et Oerke, E.-C. 2008. Spatial distribution of fusarium head blight pathogens and associated with mycotoxins in wheat fields. *Cereal Res. Commun.* 36 : 573-577.

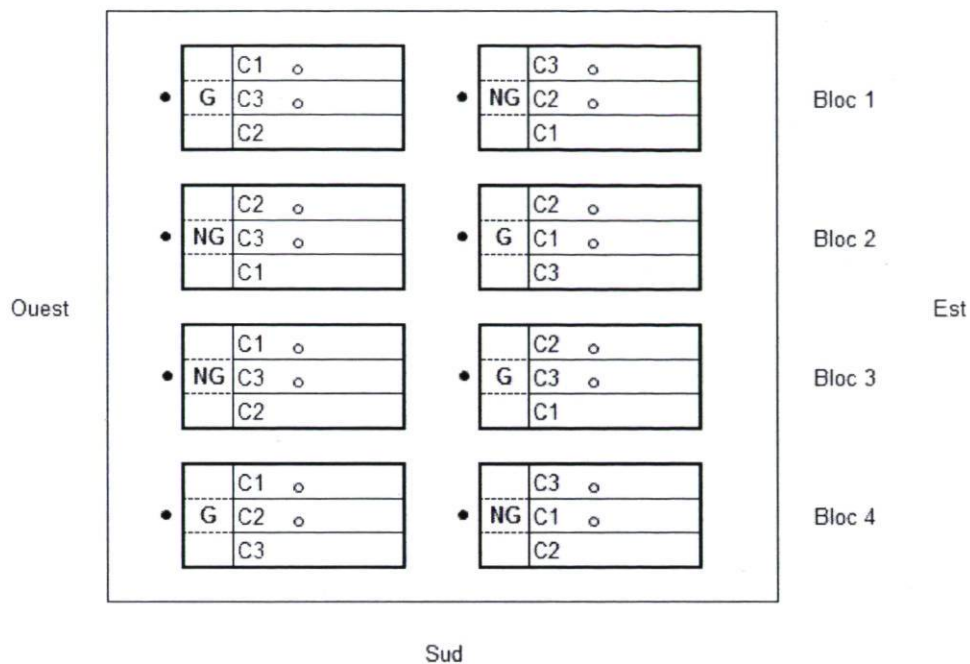
- Schmale III, D.G. et Bergstrom, G.C. 2003. Fusarium head blight – Disease cycle and epidemiology [en ligne]. American Phytopathological Society. Disponible à <http://www.apsnet.org/education/LessonsPlantPath/Fusarium/discycle.htm> [cité le 11 janvier 2010].
- Schmale III, D.G., Shah, D.A. et Bergstrom, G.C. 2005. Spatial patterns of viable spore deposition of *Gibberella zeae* in wheat fields. *Phytopathology* 95 : 472-479.
- Shaner, G. 2003. Epidemiology of fusarium head blight of small grain cereals in North America. *Dans* Fusarium head blight of wheat and barley. *Sous la direction de* K.J. Leonard et W.R. Bushnell. APS Press, St.Paul. p. 84-119.
- Snijders, C.H.A. 1994. Breeding for resistance to *Fusarium* in wheat and maize. *Dans* Mycotoxins in grain : Compounds other than aflatoxin. *Sous la direction de* J.D. Miller et H.L. Trenholm. Eagan Press, St.Paul. p. 37-58.
- Sprankle, P., Meggitt, W.F. et Penner, D. 1975. Adsorption, mobility and microbial degradation of glyphosate in soil. *Weed Sci.* 23 : 229-234.
- Stack, R.W. et McMullen, M.P. 1985. Head blighting potential of *Fusarium* species associated with spring wheat heads. *Can. J. Plant Pathol.* 7 : 79-82.
- Steffenson, B.J. 2003. Fusarium head blight of barley : impact, epidemics, management, and strategies for identifying and utilizing genetic resistance. *Dans* Fusarium head blight of wheat and barley. *Sous la direction de* K.J. Leonard et W.R. Bushnell. APS Press, St.Paul. p. 241-295.
- Steinkellner, S. et Langer, I. 2004. Impact of tillage on the incidence of *Fusarium* spp. in soil. *Plant Soil* 267 : 13-22.
- Sturz, A.V. et Johnston, H.W. 1985. Characterization of *Fusarium* colonization of spring barley and wheat produced on stubble or fallow soil. *Can. J. Plant Pathol.* 7 : 270-276.
- Sudol, T. et Krzyśko-Łupicka, T. 2005. Direct indicators of determination of glyphosate decomposition by filamentous fungi. *Physicochem. Probl. Mi.* 39 : 257-261.
- Sutton, J.C. 1982. Epidemiology of wheat head blight and maize ear rot caused by *Fusarium graminearum*. *Can. J. Plant Pathol.* 4 : 195-209.
- Teich, A.H. et Hamilton, J.R. 1985. Effect of cultural practices, soil phosphorus, potassium, and pH on the incidence of fusarium head blight and deoxynivalenol levels in wheat. *Appl. Environ. Microbiol.* 49 : 1429-1431.
- Teich, A.H. et Nelson, K. 1984. Survey of fusarium head blight and possible effects of cultural practices in wheat fields in Lambton County in 1983. *Can. Plant Dis. Surv.* 64 : 11-13.

- Tekauz, A., McCallum, B. et Gilbert, J. 2000. Review : Fusarium head blight of barley in western Canada. *Can. J. Plant Pathol.* 22 : 9-16.
- Torstensson, L. 1985. Behaviour of glyphosate in soils and its degradation. *Dans The herbicide glyphosate. Sous la direction de E. Grossbard et D. Atkinson.* Butterworths, Londres. p. 137-150.
- Torstensson, N.T.L. et Aamissepp, A. 1977. Detoxification of glyphosate in soil. *Weed Res.* 17 : 209-212.
- Wardle, D.A. et Parkinson, D. 1992. The influence of the herbicide glyphosate on interspecific interactions between four soil fungal species. *Mycol. Res.* 96 : 180-186.
- Windels, C.E. 2000. Economic and social impacts of fusarium head blight: changing farms and rural communities in the Northern Great Plains. *Phytopathology* 90 : 17-21.
- Wong, L.S.L., Tekauz, A., Leisle, D., Abramson, D. et McKenzie, R.I.H. 1992. Prevalence, distribution, and importance of fusarium head blight in wheat in Manitoba. *Can. J. Plant Pathol.* 14 : 233-238.
- Xu, X. 2003. Effects of environmental conditions on the development of fusarium ear blight. *Eur. J. Plant Pathol.* 109 : 683-689.
- Xu, X.-M., Nicholson, P., Thomsett, M.A., Simpson, D., Cooke, B.M., Doohan, F.M., Brennan, J., Monaghan, S., Moretti, A., Mule, G., Hornok, L., Beki, E., Tatnell, J., Ritieni, A. et Edwards, S.G. 2008a. Relationship between the fungal complex causing fusarium head blight of wheat and environmental conditions. *Phytopathology* 98 : 69-78.
- 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. et Ritieni, A. 2008b. Within-field variability of fusarium head blight pathogens and their associated mycotoxins. *Eur. J. Plant Pathol.* 120 : 21-34.
- Xue, A.G., Ho, K.M., Butler, G., Vigier, B.J. et Babcock, C. 2006. Pathogenicity of *Fusarium* species causing head blight in barley. *Phytoprotection.* 87 : 55-61.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T. et Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14 : 415-421.
- Zoffe, A.Z. et Palti, J. 1975. Taxonomic study of *Fusaria* of the *Sporotrichiella* section used in recent toxicological work. *Appl. Microbiol.* 29 : 575-579.

Annexe A – Schéma d'un essai en 2007 et 2008

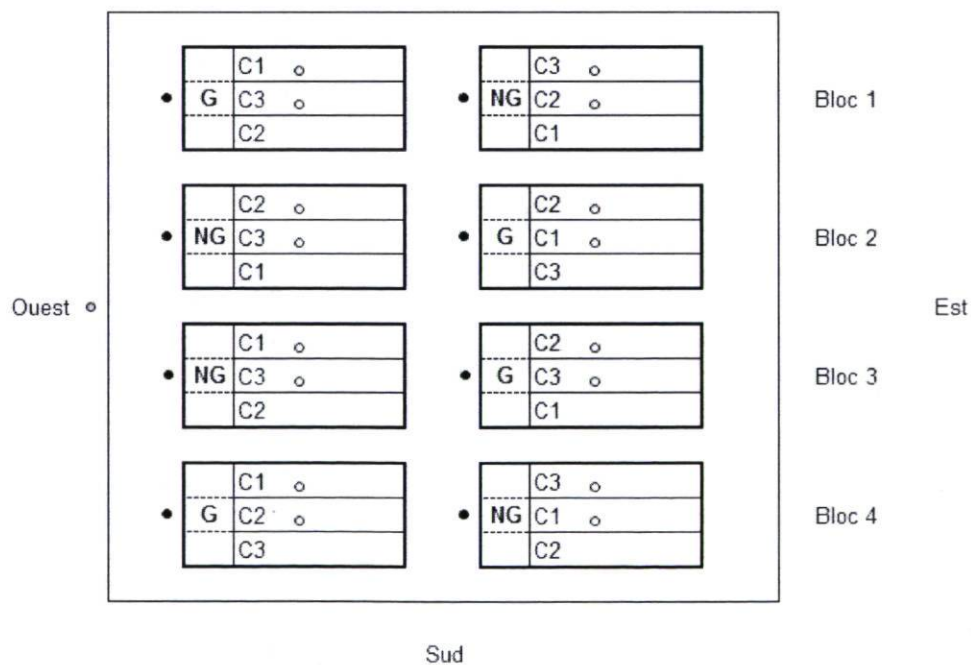
2007

Nord



2008

Nord



Légende

G = Glyphosate sur préc. soya

NG = Non glyphosate

C1, C2, C3 = Cultivars 1, 2, 3

◦ = Boîte de Pétri orientée vers le bas

• = Boîte de Pétri orientée vers le haut (int. de l'essai)

◦ = Boîte de Pétri orientée vers le haut (ext. de l'essai)

Annexe B – Analyses statistiques

Tableau I. Valeurs de F pour les variables d'indice de fusariose, de proportion de grains fusariés (FDK), de contenu en DON et de moyennes d'UFC de *F. graminearum* à la station de Saint-Augustin-de-Desmaures selon les traitements d'herbicides et de cultivars, pour les deux années combinées, avec l'année en effet fixe.

Sources de variation	Valeurs de F				
	Indice de fusariose	FDK	DON	UFC <i>F. gram.</i>	
Blé/Conventionnel	Année (A)	0.11	347.81***	353.17***	32.07***
	Herbicide (H)	0.12	4.36	1.22	3.70
	A x H	0.08	0.48	0.35	8.17*
	Cultivar (C)	0.55	11.54***	39.95***	-
	A x C	0.05	1.73	20.04***	-
	H x C	0.03	1.81	0.59	-
	A x H x C	1.01	0.72	0.92	-
Blé/Réduit	Année (A)	89.29***	292.15***	251.02***	3.65
	Herbicide (H)	0.00	0.15	0.16	0.41
	A x H	0.07	0.71	0.42	2.00
	Cultivar (C)	2.35	20.48***	29.03***	-
	A x C	2.42	5.81**	28.36***	-
	H x C	0.34	2.19	1.54	-
	A x H x C	0.14	2.32	0.11	-
Blé/Semis direct	Année (A)	0.81	221.25***	780.19***	69.10***
	Herbicide (H)	0.00	4.46	0.19	6.84*
	A x H	0.26	3.61	0.33	7.73*
	Cultivar (C)	1.48	15.46***	9.71***	-
	A x C	6.55**	8.61**	0.11	-
	H x C	0.89	0.61	0.45	-
	A x H x C	0.40	0.13	0.86	-
Orge/Conventionnel	Année (A)	-	-	267.48***	122.36***
	Herbicide (H)	-	-	2.05	2.54
	A x H	-	-	3.76	1.04
	Cultivar (C)	-	-	74.44***	-
	A x C	-	-	27.25***	-
	H x C	-	-	0.32	-
	A x H x C	-	-	0.97	-
Orge/Réduit	Année (A)	-	-	464.70***	23.54**
	Herbicide (H)	-	-	8.00*	0.01
	A x H	-	-	1.23	0.59
	Cultivar (C)	-	-	37.63***	-
	A x C	-	-	6.92**	-
	H x C	-	-	0.34	-
	A x H x C	-	-	0.31	-
Orge/Semis direct	Année (A)	-	-	250.09***	8.97*
	Herbicide (H)	-	-	0.17	2.05
	A x H	-	-	0.32	2.89
	Cultivar (C)	-	-	0.92	-
	A x C	-	-	2.10	-
	H x C	-	-	4.82*	-
	A x H x C	-	-	2.45	-

*, **, ***, significatif à 0,05, 0,01 et 0,001, respectivement.

Tableau II. Valeurs de F pour les variables d'indice de fusariose, de proportion de grains fusariés (FDK), de contenu en DON et de moyennes d'UFC de *F. graminearum* à la station de Saint-Mathieu-de-Beloil selon les traitements d'herbicides et de cultivars, pour les deux années combinées, avec l'année en effet fixe.

Sources de variation	Valeurs de F				
	Indice de fusariose	FDK	DON	UFC <i>F. gram.</i>	
Blé/Conventionnel	Année (A)	100.14***	0.11	12.54*	18.11**
	Herbicide (H)	0.01	5.51	0.07	0.01
	A x H	0.06	1.69	0.11	0.79
	Cultivar (C)	50.07***	74.22***	92.49***	-
	A x C	6.52**	0.37	7.45**	-
	H x C	1.80	0.51	0.49	-
	A x H x C	2.12	0.05	0.18	-
Blé/Réduit	Année (A)	7.17*	2.95	0.24	95.04***
	Herbicide (H)	0.10	0.20	0.07	6.33*
	A x H	2.04	1.78	0.31	0.13
	Cultivar (C)	45.80***	97.99***	138.56***	-
	A x C	2.42	2.38	8.38**	-
	H x C	0.71	0.26	0.32	-
	A x H x C	1.05	1.65	1.69	-
Blé/Semis direct	Année (A)	0.55	60.53***	16.11**	23.22**
	Herbicide (H)	0.36	2.02	0.29	0.75
	A x H	0.82	0.12	0.05	0.14
	Cultivar (C)	51.61***	147.38***	97.66***	-
	A x C	1.56	6.33**	0.48	-
	H x C	5.69**	1.74	0.22	-
	A x H x C	1.78	0.32	1.23	-
Orge/Conventionnel	Année (A)	-	-	459.07***	45.88***
	Herbicide (H)	-	-	0.04	2.07
	A x H	-	-	0.11	0.07
	Cultivar (C)	-	-	36.63***	-
	A x C	-	-	0.21	-
	H x C	-	-	3.17	-
	A x H x C	-	-	0.11	-
Orge/Réduit	Année (A)	-	-	19.82**	30.48**
	Herbicide (H)	-	-	3.49	5.03
	A x H	-	-	2.49	4.37
	Cultivar (C)	-	-	52.78***	-
	A x C	-	-	12.47***	-
	H x C	-	-	0.53	-
	A x H x C	-	-	0.08	-
Orge/Semis direct	Année (A)	-	-	8.96*	11.94*
	Herbicide (H)	-	-	0.03	5.76
	A x H	-	-	0.33	0.00
	Cultivar (C)	-	-	137.98***	-
	A x C	-	-	19.01***	-
	H x C	-	-	0.49	-
	A x H x C	-	-	3.25	-

*, **, ***, significatif à 0,05, 0,01 et 0,001, respectivement.

Tableau III. Valeurs de F du contenu en DON aux deux stations et aux deux années selon les traitements d'herbicides et de cultivars.

	Sources de variation	Valeurs de F			
		SA/2007	SA/2008	SM/2007	SM/2008
B/C ^a	Herbicide (H)	4.53	0.11	0.01	0.33
	Cultivar (C)	50.90***	27.76***	40.73***	76.80***
	H x C	0.94	0.51	1.26	0.04
B/R	Herbicide (H)	0.65	0.17	0.04	0.46
	Cultivar (C)	37.78***	19.38***	41.68***	101.97***
	H x C	0.90	1.63	0.55	1.41
B/SD	Herbicide (H)	0.01	0.50	0.08	0.28
	Cultivar (C)	2.94	28.24***	173.85***	40.44***
	H x C	0.84	0.07	1.41	0.68
O/C	Herbicide (H)	0.34	4.17	0.04	0.00
	Cultivar (C)	12.23***	72.46***	10.69**	31.33***
	H x C	0.25	0.98	0.68	2.88
O/R	Herbicide (H)	1.83	10.88*	2.99	1.31
	Cultivar (C)	11.26**	40.62***	33.59***	33.70***
	H x C	0.05	2.42	0.26	0.75
O/SD	Herbicide (H)	2.31	0.01	0.06	0.43
	Cultivar (C)	9.24**	0.07	89.06***	50.19***
	H x C	1.23	4.02*	0.55	5.40*

*, **, ***, significatif à 0,05, 0,01 et 0,001, respectivement.

^a B = blé; O = orge; C = travail conventionnel; R = travail réduit; SD = semis direct.

Tableau IV. Valeurs de F des moyennes d'UFC de *F. graminearum* à Saint-Augustin-de-Desmaures des essais blé/travail conventionnel et blé/semis direct pour les deux années selon les traitements d'herbicides.

	Sources de variation	Valeurs de F	
		2007	2008
B/C ^a	Herbicide	0.07	10.95*
B/SD	Herbicide	0.16	6.55

*, **, ***, significatif à 0,05, 0,01 et 0,001, respectivement.

^a B = blé; C = travail conventionnel; SD = semis direct.

Tableau V. Valeurs de F des moyennes d'UFC de *F. graminearum* aux deux stations pour les deux années selon les traitements d'orientation des boîtes de Pétri.

Travail du sol/station	Valeurs de F en 2007			
	Saint-Augustin/Blé	Saint-Augustin/Orge	Saint-Mathieu/Blé	Saint-Mathieu/Orge
Conventionnel	77.89***	544.24***	301.68***	29.56***
Réduit	188.94***	165.92***	106.45***	84.36***
Semis direct	291.52***	103.42***	146.71***	281.33***

Travail du sol/station	Valeurs de F en 2008			
	Saint-Augustin/Blé	Saint-Augustin/Orge	Saint-Mathieu/Blé	Saint-Mathieu/Orge
Conventionnel	15.69**	75.06***	56.73***	140.19***
Réduit	45.63***	4.32	684.73***	417.46***
Semis direct	52.05***	55.09***	38.59***	110.84***

*, **, ***, significatif à 0,05, 0,01 et 0,001, respectivement.

Annexe C – Données météorologiques

Tableau VI. Données météorologiques collectées du 15 juin au 13 juillet 2007, à Saint-Augustin-de-Desmaures. La zone ombragée correspond à la période critique d'infection du blé et de l'orge.

Jour Julien	Date	Température moyenne °C	Pluviométrie mm	Humidité relative %
166	15-juin	20,3	0,0	63,9
167	16-juin	22,0	0,0	63,4
168	17-juin	18,9	0,7	74,3
169	18-juin	18,6	0,0	57,0
170	19-juin	21,2	2,7	66,8
171	20-juin	20,5	12,2	86,4
172	21-juin	16,4	0,0	69,2
173	22-juin	16,5	0,0	60,0
174	23-juin	14,3	0,1	71,9
175	24-juin	17,1	0,0	55,6
176	25-juin	18,6	0,0	73,6
177	26-juin	23,6	2,2	75,6
178	27-juin	19,2	15,5	81,6
179	28-juin	17,3	8,1	73,6
180	29-juin	14,1	0,8	73,8
181	30-juin	13,7	0,0	71,5
182	01-juil	12,7	1,1	76,7
183	02-juil	14,9	0,0	70,3
184	03-juil	16,8	0,0	67,9
185	04-juil	16,9	4,2	82,0
186	05-juil	17,7	0,3	89,6
187	06-juil	19,5	0,5	74,6
188	07-juil	16,4	1,3	80,1
189	08-juil	17,9	3,8	66,3
190	09-juil	13,8	15,4	92,5
191	10-juil	19,7	0,0	75,2
192	11-juil	21,0	14,0	84,8
193	12-juil	19,2	0,0	73,0
194	13-juil	16,2	6,6	84,3

Tableau VII. Données météorologiques collectées du 16 juin au 24 juillet 2008, à Saint-Augustin-de-Desmaures. La zone ombragée correspond à la période critique d'infection du blé et de l'orge.

Jour Julien	Date	Température moyenne	Pluviométrie	Humidité relative
		°C	mm	%
168	16-juin	15,6	7,7	95,6
169	17-juin	16,3	6,2	92,3
170	18-juin	15,1	6,2	91,0
171	19-juin	14,5	9,4	90,5
172	20-juin	16,2	3,2	90,1
173	21-juin	16,9	0,0	88,8
174	22-juin	16,3	7,3	96,0
175	23-juin	18,0	2,9	92,0
176	24-juin	18,1	2,6	78,7
177	25-juin	18,1	8,9	79,0
178	26-juin	17,1	5,1	97,3
179	27-juin	16,8	0,0	90,1
180	28-juin	15,4	22,6	94,5
181	29-juin	15,3	17,9	97,0
182	30-juin	19,5	9,4	80,0
183	01-juil	20,0	0,2	73,8
184	02-juil	20,1	0,0	62,2
185	03-juil	18,1	24,3	89,9
186	04-juil	16,2	0,6	82,3
187	05-juil	18,6	0,1	74,8
188	06-juil	20,2	0,0	72,3
189	07-juil	22,1	0,0	73,7
190	08-juil	23,9	0,1	78,5
191	09-juil	22,1	13,3	96,6
192	10-juil	19,3	5,6	80,6
193	11-juil	17,2	0,0	78,7
194	12-juil	18,8	0,0	74,3
195	13-juil	19,9	30,4	97,0
196	14-juil	20,8	0,0	81,5
197	15-juil	19,4	0,1	82,5
198	16-juil	19,1	0,0	82,9
199	17-juil	19,7	0,0	79,7
200	18-juil	17,5	7,1	94,5
201	19-juil	19,5	7,4	90,4
202	20-juil	17,9	0,0	92,1
203	21-juil	17,7	0,0	87,1
204	22-juil	17,9	0,5	88,8
205	23-juil	18,7	1,7	90,4
206	24-juil	19,7	14,0	92,7

Tableau VIII. Données météorologiques collectées du 15 juin au 23 juillet 2007, à Saint-Mathieu-de-Beloeil. La zone ombragée correspond à la période critique d'infection du blé et de l'orge.

Jour Julien	Date	Température moyenne °C	Pluviométrie mm	Humidité relative %
166	15-juin	22,3	0,0	60,6
167	16-juin	23,7	2,2	69,4
168	17-juin	21,1	1,5	85,1
169	18-juin	19,3	0,9	62,9
170	19-juin	22,9	2,8	80,2
171	20-juin	20,3	6,1	73,0
172	21-juin	17,0	1,1	79,3
173	22-juin	16,2	1,3	67,0
174	23-juin	15,0	0,0	58,8
175	24-juin	17,5	0,0	66,4
176	25-juin	20,6	4,9	75,3
177	26-juin	25,5	0,0	69,6
178	27-juin	26,3	3,2	79,2
179	28-juin	20,0	23,0	83,1
180	29-juin	15,8	0,2	74,0
181	30-juin	15,3	0,0	74,3
182	01-juil	14,0	0,0	80,8
183	02-juil	15,6	0,0	81,1
184	03-juil	17,8	0,1	74,7
185	04-juil	18,6	0,0	91,2
186	05-juil	19,2	0,0	92,7
187	06-juil	20,6	0,0	82,5
188	07-juil	17,7	0,0	86,2
189	08-juil	18,6	0,0	87,7
190	09-juil	18,4	0,0	102,8
191	10-juil	21,5	0,0	86,9
192	11-juil	23,2	0,0	92,3
193	12-juil	19,3	0,0	76,2
194	13-juil	17,0	20,5	92,4
195	14-juil	17,4	2,3	87,3
196	15-juil	20,3	2,2	83,7
197	16-juil	19,5	0,0	75,8
198	17-juil	20,1	0,0	73,6
199	18-juil	20,7	0,0	88,7
200	19-juil	18,8	4,0	102,0
201	20-juil	16,1	26,1	103,7
202	21-juil	19,6	2,2	75,2
203	22-juil	19,9	0,1	73,1
204	23-juil	20,7	0,0	75,3

Tableau IX. Données météorologiques collectées du 16 juin au 21 juillet 2008, à Saint-Mathieu-de-Beloil. La zone ombragée correspond à la période critique d'infection du blé et de l'orge.

Jour Julien	Date	Température moyenne °C	Pluviométrie mm	Humidité relative %
168	16-juin	19,8	2,3	86,4
169	17-juin	18,1	0,3	81,7
170	18-juin	15,1	0,4	88,1
171	19-juin	15,5	0,8	89,1
172	20-juin	16,1	0,0	88,2
173	21-juin	19,5	0,0	76,1
174	22-juin	19,8	0,3	90,9
175	23-juin	18,4	0,1	92,1
176	24-juin	18,9	0,2	77,9
177	25-juin	20,8	0,0	64,9
178	26-juin	21,8	6,8	88,9
179	27-juin	22,4	0,0	88,0
180	28-juin	20,2	6,8	97,7
181	29-juin	23,3	6,3	88,4
182	30-juin	21,1	0,8	82,9
183	01-juil	21,6	0,0	68,4
184	02-juil	22,3	0,0	57,1
185	03-juil	19,8	15,1	93,5
186	04-juil	18,9	0,0	72,4
187	05-juil	21,1	0,0	69,6
188	06-juil	22,0	0,0	67,5
189	07-juil	24,1	0,0	68,7
190	08-juil	25,7	1,0	79,7
191	09-juil	22,9	25,4	95,3
192	10-juil	19,3	0,0	83,2
193	11-juil	18,8	0,0	79,3
194	12-juil	21,9	0,0	74,8
195	13-juil	22,0	16,2	98,7
196	14-juil	20,1	1,4	86,7
197	15-juil	20,2	0,1	82,3
198	16-juil	21,2	0,0	85,0
199	17-juil	22,8	0,0	72,0
200	18-juil	19,2	13,7	99,8
201	19-juil	21,7	7,8	93,7
202	20-juil	19,9	0,4	96,4
203	21-juil	21,5	4,8	90,1

Annexe D – Résultats complémentaires

Tableau X. Nombre d'UFC et proportion relative (%) des espèces de *Fusarium* identifiées une fois par semaine^a durant la période d'échantillonnage à chaque année-station, selon l'orientation de la boîte de Pétri.

	Bas			Haut		
	Espèces	# UFC	% relatif	Espèces	# UFC	% relatif
Saint-Augustin/2007	<i>F. avenaceum</i>	135	33,8	<i>F. graminearum</i>	497	61,2
	<i>F. graminearum</i>	127	31,8	<i>F. sporotrichioides</i>	138	17,0
	<i>F. sporotrichioides</i>	66	16,5	<i>F. avenaceum</i>	96	11,8
	<i>F. oxysporum</i>	22	5,5	<i>F. oxysporum</i>	38	4,7
	<i>F. equiseti</i>	20	5,0	<i>F. equiseti</i>	17	2,1
	<i>F. poae</i>	12	3,0	<i>F. tricinctum</i>	12	1,5
	<i>F. tricinctum</i>	9	2,3	<i>F. acuminatum</i>	4	0,5
	<i>F. acuminatum</i>	6	1,5	<i>F. solani</i>	4	0,5
	<i>F. solani</i>	2	0,5	<i>F. poae</i>	3	0,4
	<i>F. sambucinum</i>	1	0,3	<i>F. sambucinum</i>	2	0,2
			<i>F. culmorum</i>	1	0,1	
	Total	400	100,0	Total	812	100,0
Saint-Augustin/2008	Espèces	# UFC	% relatif	Espèces	# UFC	% relatif
	<i>F. avenaceum</i>	404	40,7	<i>F. graminearum</i>	395	35,5
	<i>F. equiseti</i>	134	13,5	<i>F. sporotrichioides</i>	328	29,4
	<i>F. graminearum</i>	122	12,3	<i>F. avenaceum</i>	269	24,1
	<i>F. sporotrichioides</i>	108	10,9	<i>F. oxysporum</i>	41	3,7
	<i>F. solani</i>	106	10,7	<i>F. solani</i>	26	2,3
	<i>F. oxysporum</i>	98	9,9	<i>F. equiseti</i>	23	2,1
	<i>F. tricinctum</i>	8	0,8	<i>F. subglutinans</i>	17	1,5
	<i>F. subglutinans</i>	7	0,7	<i>F. poae</i>	7	0,6
	<i>F. sambucinum</i>	3	0,3	<i>F. tricinctum</i>	3	0,3
<i>F. acuminatum</i>	1	0,1	<i>F. acuminatum</i>	2	0,2	
<i>F. poae</i>	1	0,1	<i>F. semitectum</i>	2	0,2	
			<i>F. sambucinum</i>	1	0,1	
	Total	992	100,0	Total	1114	100,0
Saint-Mathieu/2007	Espèces	# UFC	% relatif	Espèces	# UFC	% relatif
	<i>F. graminearum</i>	265	54,2	<i>F. graminearum</i>	3224	87,2
	<i>F. sporotrichioides</i>	120	24,5	<i>F. sporotrichioides</i>	368	10,0
	<i>F. tricinctum</i>	42	8,6	<i>F. tricinctum</i>	45	1,2
	<i>F. avenaceum</i>	24	4,9	<i>F. oxysporum</i>	24	0,6
	<i>F. solani</i>	18	3,7	<i>F. avenaceum</i>	13	0,4
	<i>F. oxysporum</i>	13	2,7	<i>F. equiseti</i>	12	0,3
	<i>F. equiseti</i>	5	1,0	<i>F. solani</i>	10	0,3
	<i>F. sambucinum</i>	2	0,4			
	Total	489	100,0	Total	3696	100,0
Saint-Mathieu/2008	Espèces	# UFC	% relatif	Espèces	# UFC	% relatif
	<i>F. avenaceum</i>	680	32,1	<i>F. graminearum</i>	2076	56,5
	<i>F. tricinctum</i>	347	16,4	<i>F. sporotrichioides</i>	417	11,3
	<i>F. sporotrichioides</i>	270	12,8	<i>F. avenaceum</i>	365	9,9
	<i>F. equiseti</i>	266	12,6	<i>F. equiseti</i>	300	8,2
	<i>F. solani</i>	197	9,3	<i>F. tricinctum</i>	170	4,6
	<i>F. graminearum</i>	165	7,8	<i>F. oxysporum</i>	142	3,9
	<i>F. oxysporum</i>	109	5,2	<i>F. solani</i>	119	3,2
	<i>F. acuminatum</i>	78	3,7	<i>F. acuminatum</i>	78	2,1
	<i>F. sambucinum</i>	2	0,1	<i>F. sambucinum</i>	8	0,2
<i>F. poae</i>	2	0,1				
	Total	2116	100,0	Total	3675	100,0

^a 2007 : 21 juin, 28 juin, 5 juillet, 12 juillet; 2008 : 20 juin, 27 juin, 4 juillet, 11 juillet, 18 juillet.

Tableau XI. Rendement, poids de 1000 grains et poids spécifique du blé et de l'orge récolté à Saint-Augustin-de-Desmaures et à Saint-Mathieu-de-Beloeil en 2007 et 2008 selon l'herbicide utilisé et le travail du sol.

	Rendement (kg/ha)			Poids 1000 grains (g)			Poids spécifique (kg/hl)		
	TC ^a	TR	SD	TC	TR	SD	TC	TR	SD
<u>Blé/SA^b2007</u>									
G ^c	3318	3727	3403	36,2	36,7	36,1	75,1	75,9	78,0
NG	3077	3741	3601	35,4	36,5	36,2	74,3	75,6	78,0
<u>Blé/SA2008</u>									
G	3091	2564	2638	35,0	34,1	33,9	75,2	75,0	75,4
NG	3105	2642	2784	35,9	34,8	34,2	75,2	75,3	74,6
<u>Blé/SM2007</u>									
G	3083	4011	4007	30,4	31,8	32,1	75,9	77,4	77,9
NG	3353	3929	3862	30,3	32,3	32,4	76,3	77,1	78,1
<u>Blé/SM2008</u>									
G	1921	2193	2349	21,5	22,9	24,2	71,8	72,5	74,0
NG	1812	2319	2146	21,8	23,1	23,7	71,7	72,8	72,8
<u>Orge/SA2007</u>									
G	5537	5507	5794	45,9	46,2	45,1	65,6	65,7	65,9
NG	5287	5298	5507	46,4	45,7	44,8	65,6	65,8	65,7
<u>Orge/SA2008</u>									
G	4415	3626	3161	40,9	42,7	40,9	61,7	61,7	64,2
NG	4292	3663	3677	40,3	42,3	41,2	61,3	61,8	64,2
<u>Orge/SM2007</u>									
G	4661	4741	4532	37,6	40,9	38,1	62,6	64,1	63,0
NG	4586	4548	4735	37,1	37,0	38,0	62,3	62,2	63,5
<u>Orge/SM2008</u>									
G	4799	4291	4662	37,6	36,1	38,5	65,0	63,5	65,3
NG	4527	4352	4377	37,4	35,6	38,8	64,9	62,8	65,0

^a TC = travail conventionnel; TR = travail réduit; SD = semis direct.

^b SA = Saint-Augustin-de-Desmaures; SM = Saint-Mathieu-de-Beloeil.

^c G = glyphosate sur préc. soya; NG = non glyphosate.

Tableau XII. Rendement, poids de 1000 grains et poids spécifique du blé et de l'orge récolté à Saint-Augustin-de-Desmaures et à Saint-Mathieu-de-Beloil en 2007 et 2008 selon le cultivar utilisé et le travail du sol.

	Rendement (kg/ha)			Poids 1000 grains (g)			Poids spécifique (kg/hl)		
	TC ^a	TR	SD	TC	TR	SD	TC	TR	SD
<u>Blé/SA^b2007</u>									
AC Barrie	3242	3565	3197	35,4	35,7	34,3	76,4	77,1	78,6
Orléans	3088	3781	3414	37,9	39,8	39,0	74,8	76,2	78,5
SS Fundy	3263	3855	3895	34,0	34,3	35,2	72,9	73,9	76,9
<u>Blé/SA2008</u>									
AC Barrie	2856	2568	2477	36,0	34,8	33,7	76,6	76,7	75,5
Orléans	3276	2613	2590	38,8	37,2	36,2	75,7	75,6	75,6
SS Fundy	3185	2628	3027	32,0	31,4	32,3	73,4	73,2	73,9
<u>Blé/SM2007</u>									
AC Barrie	3193	3749	3792	31,3	32,4	33,4	77,5	78,0	78,9
Orléans	3527	4309	4042	35,1	36,8	36,4	77,3	78,2	78,5
SS Fundy	2935	3851	3974	23,7	26,9	27,5	73,4	75,7	76,6
<u>Blé/SM2008</u>									
AC Barrie	1953	2543	2283	24,3	26,5	25,7	74,2	75,5	75,0
Orléans	2197	2459	2803	25,2	24,9	28,5	73,2	73,4	76,1
SS Fundy	1450	1766	1656	15,4	17,6	17,5	67,9	69,1	69,1
<u>Orge/SA2007</u>									
Océanik	5550	5540	5761	46,9	46,7	45,7	64,5	64,1	64,4
Raquel	5323	5363	5785	46,4	46,3	45,4	67,3	67,6	67,7
Perseis	5363	5305	5405	45,1	44,9	43,8	65,0	65,4	65,2
<u>Orge/SA2008</u>									
Océanik	4515	4085	3505	39,1	41,5	41,0	59,1	60,3	63,8
Raquel	4430	3624	3316	41,5	43,1	41,0	64,0	63,7	64,1
Perseis	4114	3225	3437	41,3	43,0	41,2	61,4	61,3	64,6
<u>Orge/SM2007</u>									
Océanik	4430	4683	4284	35,4	36,7	33,4	60,0	60,6	58,8
Raquel	4760	4683	4728	37,5	39,3	38,7	64,5	65,4	65,9
Perseis	4681	4568	4889	39,2	40,8	42,1	62,8	63,5	65,0
<u>Orge/SM2008</u>									
Océanik	4739	4357	4628	35,7	34,2	36,8	61,5	59,2	61,1
Raquel	4727	4472	4469	38,8	36,9	39,7	67,8	66,3	68,0
Perseis	4523	4151	4462	38,1	36,5	39,4	65,5	63,9	66,5

^a TC = travail conventionnel; TR = travail réduit; SD = semis direct.

^b SA = Saint-Augustin-de-Desmaures; SM = Saint-Mathieu-de-Beloil.