

UTILISATION DES FONGICIDES FOLIAIRES EN GRANDES CULTURES

Réalisé par :

Gilles Tremblay, CÉROM
Julie-Éléonore Maisonhaute, CÉROM
Sylvie Rioux, CÉROM
Yvan Faucher, MAPAQ

Juin 2016



TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1	1
Synthèse – Utilisation des fongicides foliaires en grandes cultures	1
Effets indésirables.....	2
Effets sur l’environnement et sur la santé humaine	2
Solutions alternatives aux fongicides foliaires	3
Littérature citée	4
CHAPITRE 2	7
Utilisation des fongicides foliaires dans les céréales	7
Efficacité des fongicides foliaires	7
Moments d’application	11
Rentabilité économique	13
Effets indésirables.....	15
Effets sur l’environnement et sur la santé humaine	15
Solutions alternatives aux fongicides foliaires	15
Maladies fongiques retrouvées au Québec	16
Rouilles des céréales	16
Taches bronzées (<i>Pyrenophora tritici-repentis</i>)	17
Taches septoriennes/septoriose (<i>Septoria tritici</i>), moucheture (<i>stagonosporose</i>) et tache des glumes (<i>Stagonospora nodorum</i>)	18
Oïdium (<i>Blumeria graminis</i>).....	20
Fusariose de l’épi (<i>Fusarium graminearum</i> et <i>Fusarium spp.</i>).....	21
Piétin-verse (<i>Tapesia yallundae</i>) et Rhizoctone ocellé (<i>Rhizoctonia cerealis</i>).....	22
Rayure réticulée de l’orge (<i>Pyrenophora teres</i> , <i>anamorphe Drechslera teres</i>) et Rhynchosporiose (<i>Rhynchosporium secalis</i>)	22
Littérature citée	25
CHAPITRE 3	29
Utilisation des fongicides foliaires dans le maïs	29
Efficacité des fongicides foliaires	29
Moments d’application	31
Rentabilité économique	31
Solutions alternatives aux fongicides foliaires	32
Maladies fongiques retrouvées au Québec	33
Anthracnose (<i>Colletotrichum graminicola</i>)	33

Dessèchement (<i>Exserohilum turcicum</i> , forme sexuée : <i>Setosphaeria turcica</i>)	33
Dessèchement (<i>Setosphaeria turcica</i> = forme asexuée de <i>Exserohilum turcicum</i>)	34
Kabatiellose (<i>Aureobasidium zeae</i>).....	34
Taches grises (<i>Cercospora zeae-maydis</i>).....	35
Rouille commune (<i>Puccinia sorghi</i>).....	36
Charbon commun (<i>Ustilago zeae</i>).....	37
Littérature citée	41
CHAPITRE 4	45
Utilisation des fongicides foliaires dans le soya.....	45
Efficacité des fongicides foliaires	45
Moments d'application	47
Rentabilité économique	47
Effets indésirables.....	48
Solutions alternatives aux fongicides foliaires	48
Maladies fongiques retrouvées au Québec	49
Maladie des taches brunes/taches septoriennes (<i>Septoria glycines</i>)	49
Cercosporose/taches globuleuses (<i>Cercospora sojae</i>)	50
Cercosporose tardive/maladie des graines pourpres (<i>Cercospora kikuchii</i>).....	51
Pourriture à sclérotés (sclérotiniose) (<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>).....	51
Pourriture des graines/ Phomopsis (<i>Phomopsis longicolla</i>).....	52
Oïdium (<i>Microsphaera diffusa</i>).....	52
Mildiou (<i>Peronospora manshurica</i>)	53
Littérature citée	55

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Effets de différentes méthodes de lutte contre les maladies fongiques des céréales	24
Tableau 2 : Informations sur certains fongicides foliaires disponibles.....	38
Tableau 3 : Stades phénologiques du maïs.	39
Tableau 4 : Effets de différentes méthodes de lutte contre les maladies fongiques du maïs.....	40
Tableau 5 : Effets de différentes méthodes de lutte contre les maladies fongiques du soya	54

CHAPITRE 1

Synthèse – Utilisation des fongicides foliaires en grandes cultures

Les pertes causées par les organismes pathogènes aux cultures dans le monde sont relativement stables depuis les années 1940. Les maladies, les insectes ravageurs et les mauvaises herbes contribuent dans des proportions similaires aux pertes totales de l'ensemble des cultures qui ont varié de 31 à 37 % au cours de la période de 1940 à 1989 (Oerke 1999; Oerke et Dehne 2004; Pimentel et al. 1993; Popp et al. 2013). Ce constat a peu changé depuis 1989.

L'utilisation de fongicides foliaires peut s'avérer efficace pour lutter contre certaines maladies fongiques et pourrait permettre d'augmenter les rendements en grains des céréales, du maïs et du soya. Cependant, les résultats obtenus sont très variables selon les études. Plusieurs facteurs peuvent en effet influencer les résultats obtenus notamment les sites, les années, les cultivars et les fongicides utilisés. La rentabilité des fongicides foliaires est elle aussi très variable selon les études. Plusieurs critères devraient être évalués avant de décider d'utiliser des fongicides foliaires en grandes cultures : la résistance ou la sensibilité des cultivars et des hybrides, les quantités de résidus de culture au champ, le précédent cultural, les dates de semis, les prévisions météorologiques, les coûts d'achat et d'application des fongicides, etc. La décision d'utiliser ou non des fongicides foliaires en grandes cultures devrait reposer sur plusieurs critères, mais avant tout sur la présence réelle des maladies au champ.

De manière générale, il est important de faire la différence entre les notions d'efficacité, de gain de rendement et de rentabilité économique, car un fongicide foliaire peut être efficace en termes de réduction des niveaux d'infection, mais sans toutefois avoir un impact significatif sur le rendement en grains ou engendrer des bénéfices économiques. De plus, les résultats peuvent être différents en présence ou en absence de maladies et peuvent aussi varier selon le type de fongicide. Dans la documentation en économie agricole, les pesticides sont reconnus comme un intrant qui protège les rendements potentiels plutôt que de les augmenter. Ainsi, il s'agit davantage d'un outil de gestion du risque que d'un intrant conventionnel. Dans cette perspective, la tolérance au risque des producteurs est un facteur déterminant. S'il y a surestimation du risque, le producteur risque d'entreprendre des traitements phytosanitaires inutiles et alors, détériorer la rentabilité de l'entreprise. Par ailleurs, des risques environnementaux supplémentaires associés à des traitements inutiles s'ajoutent à la perte de rentabilité à l'échelle de la ferme. Ces risques pour l'environnement et pour la santé se traduisent ensuite en coûts sociaux. Par conséquent, l'utilisation préventive plutôt que curative des fongicides foliaires ne se justifie souvent pas sur les plans autant économique que social (Belzile 2016).

La majorité des fongicides foliaires appliqués en grandes cultures appartiennent aux familles des strobilurines (groupe 11), des triazolinthiones (groupe 3) et des carboxamides (groupe 7). Ces fongicides agissent sur les champignons en bloquant la synthèse d'éléments vitaux de ces derniers. Les strobilurines (ACAPELA, HEADLINE, QUADRIS, QUILT, PRIAXOR, STRATEGO) bloquent la synthèse des quinones dans les mitochondries des cellules des champignons. Il existe cinq matières actives dans la famille des strobilurines :

l'axoxystrobine, la fluoxastrobine, la picoxystrobine, la pyraclostrobine et la trifloxystrobine. Quant à eux, les triazolinthiones (propiconazole, prothioconazole) bloquent la synthèse des stérols (des lipides ou des gras) nécessaires au bon fonctionnement cellulaire des champignons (QUILT, PROLINE, STRATEGO). Enfin, les carboxamides (fluxapyroxade, penthiopyrade) bloquent la synthèse d'un enzyme (déshydrogénase succinate) essentiel aux mitochondries des cellules des champignons (PRIAXOR).

Effets indésirables

Les fongicides foliaires peuvent avoir plusieurs impacts négatifs lorsqu'ils sont appliqués sans raison ou au mauvais moment (Hershman et al. 2011). En effet, les champignons responsables des maladies fongiques peuvent développer des résistances à certains fongicides comme les strobilurines et les triazoles. Plusieurs scénarios peuvent conduire au développement de résistances : des applications répétées d'une même matière active dans un champ; l'application d'une dose réduite de fongicide, car cela ne tue pas le champignon et peut donc le rendre moins sensible; l'application de fongicides si l'infestation est sévère et que le champ ne peut pas être récupéré. Les strobilurines ont été classées comme ayant un risque élevé de développement de résistance. Plus de 40 agents pathogènes ont déjà développé des résistances à cette famille de fongicides. Dans certains cas, le développement de la résistance est apparu dans les deux années suivant l'application du fongicide (Wise et Mueller 2011). Il est important de noter que les fongicides de la famille des strobilurines ont été classés par le Fungicide Resistance Action Committee (FRAC) comme ayant un haut risque de résistance (Henry et al. 2011). Chez les céréales à paille, des champignons résistants aux fongicides ont été répertoriés en Europe (de Bastard et al. 2015). Ces résistances concernent la septoriose, l'oïdium, le piétin-verse, l'helminthosporiose du blé et de l'orge, la rhynchosporiose de l'orge ou encore la fusariose des céréales.

L'application de fongicides (ex. strobilurines) de manière préventive pourrait aussi avoir comme conséquence d'accroître les populations d'insectes ravageurs (Hershman et al. 2011). En effet, l'application de fongicides peut amener à supprimer des champignons entomopathogènes qui s'attaquent aux insectes. L'absence de ces champignons bénéfiques pourrait se traduire par des augmentations d'insectes ravageurs et la nécessité de devoir appliquer un insecticide, ce qui engendre des coûts additionnels (Koch et al. 2010; Mueller 2014; Wise et Mueller 2011). Des applications préventives de fongicides dans le soya pourraient provoquer le développement de pourritures à sclérotés qui peut engendrer des pertes importantes de rendements (Filion et al. 2009; Mueller 2014). De plus, l'application de fongicides de manière préventive va à l'encontre même des principes de l'agriculture durable, puisque les fongicides appliqués peuvent contaminer l'environnement et peuvent aussi détruire les organismes bénéfiques du sol (Hershman et al. 2011).

Effets sur l'environnement et sur la santé humaine

Le site Web SAgE pesticides (2015) a été mis en place au Québec afin de répertorier l'impact de différents pesticides sur l'environnement et sur la santé humaine. En consultant ce site, on peut observer que la toxicité aiguë des fongicides foliaires s'avère extrêmement variable d'un produit à l'autre, allant de légère (prothioconazole, tétraconazole, flusilazole, fluxapyroxade) à élevée (pyraclostrobine, picoxystrobine, trifloxystrobine, propiconazole, tébuconazole, chlorothalonile). En revanche, la toxicité à long terme apparaît beaucoup plus importante pour les fongicides appartenant à la famille des triazoles, pour le fluxapyroxade

ou encore pour le mancozèbe (toxicité élevée à extrêmement élevée et effets cancérigènes) alors que les strobilurines présentent une toxicité à long terme faible à modérée.

Des caractéristiques très variables sont également observées en ce qui concerne le lessivage des molécules ou leur persistance dans le sol. Enfin, si ces produits ont un faible impact sur les populations d'abeilles et d'oiseaux, leur toxicité pour les organismes aquatiques (poissons et daphnies) s'avère plus élevée, avec une toxicité modérée (plusieurs fongicides de la famille des triazoles) à extrêmement élevée.

Solutions alternatives aux fongicides foliaires

L'utilisation de cultivars et d'hybrides plus tolérants aux maladies fongiques constitue une solution alternative à l'application des fongicides foliaires (Hershman et al. 2011; Lauer 2007). Les données sur les niveaux de tolérance des hybrides face à différentes maladies fongiques sont généralement disponibles auprès des compagnies semencières. Le réseau des grandes cultures du Québec (RGCQ) publie annuellement des données relatives à la sensibilité de plusieurs maladies touchant les céréales (avoine, blé, orge, seigle et triticale). Le RGCQ publie aussi des données relatives à la sensibilité à la pourriture à sclérotés touchant les cultivars de soya.

Les infestations peuvent aussi être limitées en réalisant des rotations de cultures, en effectuant un travail du sol avec enfouissement des résidus, en utilisant des semences de qualité traitées aux fongicides, en drainant adéquatement les champs et en contrôlant les populations d'insectes (Bailey et al. 2000; Lipps et al. 2004). La rotation des cultures aurait dans l'ensemble un effet beaucoup plus positif sur la sévérité des maladies et le rendement en grains. Dans le cas de systèmes avec un travail du sol réduit, des hybrides de maïs résistants devraient être utilisés et la durée de la rotation devrait être augmentée. Le développement de maladies pourrait aussi être réduit en asséchant correctement les grains et en maintenant de bonnes conditions d'entreposage (Lipps et al. 2004).

Certaines maladies fongiques seraient influencées par le travail du sol. Ainsi, l'incidence de l'helminthosporiose dans les champs de céréales pourrait être réduite en pratiquant le semis direct, mais ce genre de pratique a aussi pour effet d'augmenter l'incidence de la maladie des taches bronzées, de la septoriose et de la fusariose (Bailey et Duczek 1996). Selon d'autres études effectuées au Canada, un travail réduit du sol ne favoriserait pas les maladies fongiques, n'augmenterait pas les pertes et n'aurait pas d'effet non plus sur la sévérité des taches foliaires chez les céréales (Bailey et al. 2000; Kutcher et al. 2011).

Littérature citée

Bailey K.L. et Duczek L.J. 1996. Managing cereal diseases under reduced tillage. *Can. J. Plant Pathol.* 18(2):159-167.

Bailey K.L., Johnston A.M., Kutcher H.R., Gossen B.D. et Morrall R.A.A. 2000. Managing crop losses from foliar diseases with fungicides, rotation, and tillage in the Saskatchewan Parkland. *Can. J. Plant Sci.* 80(1):169-175.

Belzile L. 2016. Utilisation des fongicides foliaires en grandes cultures (volet économique). Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 19 p. Disponible à l'adresse : <http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/rapporfinalfongicidesfoliairesgrandescultures.pdf>

de Bastard L., Beauvallet G., Champroux G. 2015. Note commune - Résistances aux fongicides - Céréales à pailles. Groupe Résistance aux fongicides, INRA, ANSES, ARVALIS - Institut du Végétal, 12 p.

Filion P., Rioux S. et Tremblay G. 2009. Avons-nous besoin de fongicides pour le soya au Québec. Réseau d'avertissements phytosanitaires - Bulletin d'information - Grandes cultures n° 3 - 28 avril 2009. Agri-réseau, Québec, 8 p. Disponible à l'adresse : <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/b03gc09.pdf>

Henry R.S., Johnson W.G. et Wise K.A. 2011. The impact of a fungicide and an insecticide on soybean growth, yield, and profitability. *Crop Prot.* 30(12):1629-1634.

Hershman D.E., Vincelli P. et Kaiser C.A. 2011. Foliar Fungicide Use in Corn and Soybeans. Plant Pathology Fact Sheet, University of Kentucky, Plant Pathology Extension, p. Disponible à l'adresse : http://www2.ca.uky.edu/agcollege/plantpathology/ext_files/PPFShtml/PPFS-GEN-12.pdf

Koch K.A., Potter B.D. et Ragsdale D.W. 2010. Non-target impacts of soybean rust fungicides on the fungal entomopathogens of soybean aphid. *J. Invertebr. Pathol.* 103(3):156-164.

Kutcher H.R., Johnston A.M., Bailey K.L. et Malhi S.S. 2011. Managing crop losses from plant diseases with foliar fungicides, rotation and tillage on a Black Chernozem in Saskatchewan, Canada. *Field Crops Res.* 124(2):205-212.

Lauer J. 2007. To spray or not to spray – Will foliar fungicide be routine in the new corn production economics? . *Field Crops* 28:45-52.

Lipps P., Dorrance A. et Mills D. 2004. Corn disease management in Ohio. The Ohio State University Extension, pp. 20

Mueller D.S. 2014. Are Fungicides Useful in Soybean Production? In: Proceedings of the Agri-Vision, Saint-Hyacinthe, 3 décembre 2014.

Oerke E.C. 1999. Estimated crop losses due to pathogens, animal pests and weeds. In: Crop production and crop protection, Estimated losses in major food and cash crops. Elsevier Science. Amsterdam. ISBN 0-444-82095-7.

Oerke E.C et Dehne H.W. 2004. Safeguarding production - losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Protection.* 23(4):275-285.

Pimentel D., McLaughlin L., Zepp A., Lakitan B., Kraus T., Kleinman P., Vancini F., Roach W.J., Graap E., Keeton W.S. et Selig G. 1993. Environmental and economic effects of reducing pesticide use in agriculture. *Agri. Eco. Env.* 46:273-288.

Popp J., Peto K. et Nagy J. 2013. Pesticide productivity and food security. A review. *Agron. Sus. Dev.* 33:243-255.

SAGÉ pesticides. 2015. Effets toxiques des matières actives. Disponible à l'adresse <http://www.sagepesticides.gc.ca/Recherche/RechercheMatières.aspx> consultée le 3 mars 2015

Wise K. et Mueller D. 2011. Are Fungicides No Longer Just For Fungi? An Analysis of Foliar Fungicide Use in Corn. The American Phytopathological Society, Disponible à l'adresse <http://www.apsnet.org/publications/apsnetfeatures/Pages/fungicide.aspx>

CHAPITRE 2

Utilisation des fongicides foliaires dans les céréales

Efficacité des fongicides foliaires

Au niveau mondial, la perte annuelle moyenne de rendement associée aux maladies du blé est de l'ordre de 12 %. L'incidence des maladies fongiques diffère grandement selon les sites et les années. Par exemple, dans une étude effectuée au Kansas entre 1976 et 2000 portant sur 18 maladies, les pertes annuelles dues aux maladies du blé variaient entre 10 et 22 % (*Puccinia triticina* : 3,5 %; virus de la mosaïque du blé : 1,9 %; *Septoria* : 1,6 %), mais lorsque chaque maladie était prise individuellement, les pertes étaient généralement inférieures à 3 % (exception faite des grosses épidémies occasionnelles) (Bockus et al. 2001). Dans une autre étude effectuée sur 22 pays en voie de développement sur une période de 10 ans, la perte moyenne de rendement attribuable à la rouille des feuilles était de 3,7 % (Marasas et al. 2004, lu dans Duveiller et al. 2007). Certaines maladies ont une incidence plus grande sur les céréales. Au Luxembourg, la principale maladie fongique observée dans les céréales est la septoriose, avec en moyenne 70 % de la surface des deux feuilles supérieures infestée aux stades Zadoks 77 à 87 (El Jarroudi et al. 2015), alors que la sévérité de l'oïdium ne dépasse pas 20 %.

Il est important de noter qu'il n'existe pas nécessairement de relation linéaire ou proportionnelle entre les dommages causés par les maladies fongiques et les pertes de rendement (Duveiller et al. 2007). L'utilisation de fongicides foliaires peut s'avérer efficace pour lutter contre certaines maladies fongiques des céréales. Dans l'ensemble, l'application de fongicides pourrait permettre de réduire les maladies foliaires (ex. rayure réticulée) et la contamination au désoxinivalénoïl ou DON de 59 à 79 %, de retarder la sénescence des plantes et d'augmenter le rendement, la qualité du grain et le poids des grains (Marinaccio et al. 2015). Aux États-Unis, les fongicides foliaires sont reconnus efficaces pour réduire les infestations de taches foliaires ou de fusariose dans le blé d'hiver, et peuvent maîtriser presque totalement la rouille des feuilles (Ransom et McMullen 2008). Selon une étude canadienne, l'utilisation de fongicides dans l'orge aurait permis un gain de rendement de 305 kg/ha (soit 6 %), mais n'aurait pas d'effet sur la concentration en protéines (Karamanos et al. 2012). Dans cette étude, l'effet des fongicides sur le rendement était significatif pour les sites possédant le plus haut potentiel de rendement (8 t/ha), mais non significatif pour les sites possédant un faible potentiel de rendement (3 t/ha). Selon une autre étude canadienne, la répression des maladies dans le blé tendre rouge d'hiver dépendrait non seulement des fongicides foliaires, mais aussi de la dose d'azote appliquée (Brinkman et al. 2014).

Les résultats d'une étude réalisée au Québec visant à comparer l'effet de l'application de fongicides sur l'incidence des maladies foliaires et de la fusariose dans le blé, l'orge et l'avoine (Rioux et al. 2013), indiquaient que l'utilisation d'un fongicide de synthèse permettait de réduire l'intensité des taches foliaires des céréales, alors que le bioagent *Clonostachys rosea* (CLO1, 620g/ha) n'a pas eu d'impact sur ces maladies. Les fongicides à usage spécifique contre les maladies du feuillage (QUILT, STRATEGO, PIVOT et

HEADLINE) n'avaient pas réduit le contenu des grains en désoxynivaléol (DON) quelle que soit l'espèce de céréale. Rioux et al. (2103) ont même observé une hausse du contenu en DON avec le HEADLINE (pyraclostrobine) dans l'orge et l'avoine et avec le QUILT (azoxystrobine, propiconazole) dans l'orge. Même si ces fongicides avaient permis d'augmenter les rendements, Rioux et al. (2013) ne voyaient pas vraiment l'avantage à les utiliser, particulièrement dans le cas de l'orge qui est plus sensible à la fusariose. Pour ce qui est des autres fongicides destinés à lutter contre la fusariose, le PROLINE (prothioconazole) et le PROSARO (prothioconazole, tébuconazole) ont permis de réduire la contamination des grains en DON de 46 % dans le blé, 34 % dans l'orge et 25 % dans l'avoine. Le FOLICUR (tébuconazole) a réduit le contenu en DON seulement chez le blé et de façon moins efficace (30 %) que le PROLINE (prothioconazole) et le PROSARO (prothioconazole, tébuconazole). Quant au CLO1, il n'a pas eu d'impact sur la teneur en toxine. L'utilisation des fongicides homologués contre la fusariose semble justifiée et rentable les années de fusariose puisqu'ils améliorent à la fois le rendement et la qualité du grain. Par contre, ils ne réussissent pas toujours à abaisser la teneur en DON sous le seuil de 2 ppm, seuil au-delà duquel la commercialisation devient plus difficile. Selon ces auteurs, l'application de fongicides en cas de risque d'infection doit plutôt accompagner les moyens de lutte de base que sont la rotation adéquate des cultures (espèces non-hôtes l'année précédant la céréale) et l'utilisation de cultivars plus résistants. D'autres mesures comme un semis hâtif, une réduction de la verse et une récolte au bon moment peuvent, elles aussi, aider à réduire l'incidence de cette maladie.

En Europe, il a été montré que les fongicides foliaires à base de strobilurines ou de triazoles offraient une maîtrise équivalente des maladies fongiques. Cependant, contrairement aux triazoles, les fongicides à base de strobilurines sont associés à un « effet vert », caractérisé par le maintien du feuillage vert plus tard en saison, ce qui maximiserait le remplissage des grains et agirait positivement sur le rendement. Cet effet vert des strobilurines s'explique soit par des effets physiologiques (activité photosynthétique, quantité de chlorophylle, retard de sénescence, impact sur la consommation d'eau, etc.) soit par le fait que les strobilurines, contrairement aux triazoles, empêchent les spores de champignons de germer (pathogènes, non pathogènes ou saprophytes) et donc la plante n'aurait pas besoin de développer des mécanismes de défense coûteux en énergie (Bartlett et al. 2002). L'utilisation de strobilurines (ex. azoxystrobine, trifloxystrobine, picoxystrobine ou pyraclostrobine) procurerait des effets bénéfiques pour les céréales, avec un effet positif sur le rendement et la taille des grains (Bartlett et al. 2002). L'application de strobilurines peut aussi se traduire par une augmentation des contenus en DON (Rioux et al. 2013).

Dans leur revue de littérature, Poole et Arnaudin (2014) répertorient plusieurs études ayant montré une relation entre la rétention de la verdure des feuilles (effet vert) et le gain de rendement (Ali et al. 2011; Hunt et Poole 2010; Reynolds et al. 2011). Ils précisent que chaque perte de verdure de 1 % se produisant sur la feuille située sous la feuille étendard est reliée à une perte de rendement de 20 kg/ha. Les gains de rendement observés à la suite d'un effet vert peuvent s'expliquer par le retard de sénescence et le prolongement de la période de remplissage des grains (Spiertz 1977). Cependant, selon Poole et Arnaudin (2014), la disponibilité de l'eau durant le remplissage des grains est la composante la plus importante pour expliquer, dans l'ensemble, la réponse du rendement et la rentabilité des traitements fongiques. Une faible disponibilité en eau serait associée à moins de maladies et à une période de remplissage des grains plus courte. De plus, il y a une limite aux bénéfices que peut apporter l'effet vert. En effet, à partir de 700 à 725 degrés/jours après l'anthesis, il n'y aurait plus de bénéfices à retarder la sénescence des feuilles (Pepler et al. 2005).

Globalement, les gains de rendement obtenus à la suite de l'application de fongicides sont variables selon les sites et les années (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2012; Ransom et McMullen 2008; Thompson et al. 2014). Au Luxembourg, une étude a montré que l'application de fongicides foliaires avait permis des gains de rendement variant de 1 à 81 % (El Jarroudi et al. 2015). Durant les années de forte pression des maladies, les traitements fongiques effectués lorsque recommandés assuraient un gain de rendement moyen variant de 4 à 42 % par rapport au témoin selon les sites et les années (El Jarroudi et al. 2015). En Italie, ce sont des gains de rendement variant de 9 à 49 % qui ont été rapportés à la suite de l'application de fongicides foliaires (Marinaccio et al. 2015). En Suède, une étude menée sur 25 ans a montré que l'application de fongicides dans le blé d'hiver permettait des gains de rendement au cours de toutes les années, mais qu'ils n'étaient significatifs que dans la moitié des cas (13 années sur 25), avec des gains variant de 1 à 1,9 t/ha. Dans l'autre moitié des cas, le rendement dans les parcelles traitées n'était pas différent de celui des parcelles non traitées avec des gains \leq 300 kg/ha (Wiik et Rosenqvist 2010). Aux États-Unis, toujours dans le blé d'hiver, des gains de rendement moyens entre 5,5 et 44 % ont été observés à la suite de l'application de fongicides (Ransom et McMullen 2008 : moyenne de tous les sites et cultivars). Au Canada, on note également des effets significatifs des fongicides, puisqu'ils permettent de réduire la gravité des maladies foliaires et d'augmenter les rendements de 9 à 19 %, mais n'ont toutefois pas d'effet lors d'une année très sèche (Kutcher et al. 2011). Chez l'orge, un effet significatif des fongicides a aussi été observé, entraînant en une réduction de la gravité des maladies et, dans la majorité des cas, à une augmentation du rendement en grains (Bailey et al. 2000).

Les gains de rendement observés à la suite de l'application de fongicides diffèrent aussi selon les maladies. En Suisse, des seuils d'intervention ont été fixés pour déterminer si un traitement fongicide est nécessaire dans le blé d'automne. Ces seuils sont, en termes de pourcentage de pousses atteintes, de 15 % d'infestation pour le piétin-verse (aux stades 31-32), de 25 % pour l'oïdium (stades 31-59), de 15 % pour les septorioses (stades 41 à 59), et de 5 % (stades 37 à 43) ou 1 % (stades 45 à 61) pour la rouille brune (Gindrat et al. 2004). Cependant, des gains de rendement ne sont pas toujours obtenus et de grandes différences peuvent être observées selon les régions et la présence/absence de maladies. En effet, pour le piétin-verse, un gain de rendement à la suite de l'application de fongicides (peu importe le stade) a été observé dans moins de 30 % des cas. Pour les autres maladies, un gain de rendement supérieur est obtenu si le traitement est effectué lorsque le seuil recommandé est atteint (Gindrat et al. 2004). Dans l'ensemble, des gains de rendement seraient observés dans 25 % des cas et varieraient de 50 % à 75 % selon les régions. Au Danemark, la lutte à l'oïdium et à la rouille par l'application de fongicides s'avère rarement rentable, avec des gains de rendement respectifs de 120 à 200 kg/ha et de 80 à 230 kg/ha (Jørgensen et al. 2008).

Les gains de rendement sont également variables d'un cultivar à l'autre. L'utilisation de cultivars résistants peut aider à minimiser les pertes de rendement, alors que l'utilisation de fongicides s'avère plus profitable pour des cultivars sensibles (Jørgensen et al. 2008). Ces différences observées entre les cultivars sont d'autant plus grandes si les conditions sont favorables au développement des maladies (Brinkman et al. 2014). Au Danemark, l'utilisation de fongicides sur des cultivars sensibles de blé d'hiver avait plus d'impacts lorsque les infestations étaient plus sévères. Les augmentations de rendement étaient de 600 kg/ha pour les cultivars sensibles comparativement aux résistants lors d'infestations sévères, mais n'étaient que de 150 kg/ha lors de plus faibles infestations (Jørgensen et al. 2008). Dans une étude américaine, l'application de fongicides (propiconazole + azoxystrobine ou propiconazole + trifloxystrobine) sur du blé rouge d'hiver a également

permis un gain de rendement pour des cultivars sensibles, alors que pour des cultivars résistants ou intermédiaires, le gain de rendement n'était observé qu'à un seul des deux sites (Thompson et al. 2014). Le gain de rendement était plus important lorsqu'une forte infestation de rouille des feuilles était observée. Une autre étude effectuée dans le blé d'hiver a mis en évidence que des cultivars sensibles répondaient mieux à l'application de fongicides foliaires. Ce n'était toutefois pas le cas lors d'années de fortes pressions de fusariose où une meilleure réponse à un traitement fongicide était observée pour les cultivars moins sensibles (Ransom et McMullen 2008).

L'effet des fongicides sur le rendement dépend également des produits utilisés. Au Canada, des essais effectués dans le blé ont montré que des applications de pyraclostrobine ou de propiconazole + trifloxystrobine avaient permis des gains de rendement respectifs de 14 à 15 % et de 0 à 16 %, alors que des applications de propiconazole ou de prothioconazole avaient engendré des pertes de rendement de 3 et 8 % respectivement (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2012). Dans une autre étude, toujours effectuée dans le blé, l'application de propiconazole a permis de réduire les maladies fongiques dans la moitié des cas (2 années sur 4) et a eu un effet très variable sur le rendement (Bailey et al. 2000). Dans l'orge, un gain de rendement a été observé à la suite de l'application de pyraclostrobine (4 à 17 %), mais des pertes de rendement ont été rapportées à la suite de l'application de propiconazole (3 à 13 %), de prothioconazole (13 %) ou de propiconazole + trifloxystrobine (9 à 24 %) (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2012). Dans une étude effectuée au Canada, l'application de propiconazole a cependant permis de réduire la gravité des maladies dans l'orge et d'augmenter les rendements de 23 % et les poids de 1 000 grains de 13 % (Bailey et al. 2000).

Dans leur revue de littérature, Poole et Arnaudin (2014) soulignent l'importance de protéger la feuille étendard (Hardwick et al. 2001) et font un lien direct entre l'efficacité des traitements fongicides et l'application des produits au niveau de la canopée supérieure (Hansen et al. 1994; Poole 2009). Pour le blé d'automne, il est rappelé que 70 % du rendement dépend de l'activité des trois dernières feuilles, dont 43 % de la feuille étendard (HGCA 2011). La réponse du rendement à l'application de fongicides dépendrait donc de la présence de maladies au moment de la sortie de la feuille étendard ou suivant celle-ci. Pour l'orge, ce n'est pas la feuille étendard, mais bien la feuille située sous la feuille étendard qui serait la plus importante.

Selon une étude canadienne, plusieurs facteurs influencent le rendement dans du blé rouge d'hiver : le cultivar, la fertilisation azotée, l'application de fongicides, mais aussi l'interaction azote x fongicide x cultivar (Brinkman et al. 2014). Dans cette étude, les rendements variaient dans l'ensemble selon les sites et les cultivars, avec des valeurs comprises entre 4,9 et 9,1 t/ha. Dans cette même étude, il n'y avait pas d'effet global des fongicides sur le nombre d'épi/m², mais ces derniers induisaient une augmentation du nombre de grains/épi. Une interaction positive (synergie) était également observée entre les doses d'azote et l'application de fongicides. En effet, l'effet des fongicides était plus marquée pour de fortes doses d'azote, ce qui est comparable aux résultats obtenus dans d'autres études (Kelley 2001; Olesen et al. 2000; Ruske et al. 2003). Par exemple, trois applications de fongicides ont permis d'obtenir des gains de rendement de 0,67 t/ha pour une dose de 100 kg N/ha et de 0,97 t/ha pour une dose de 170 kg N/ha (Brinkman et al. 2014). En revanche dans l'orge, une étude canadienne a montré qu'il n'existait pas une telle interaction fongicides et fertilisation (0-90 kg N/ha) (Karamanos et al. 2012).

Enfin, les conditions météorologiques et l'intensité des infestations jouent un grand rôle dans l'effet que peuvent avoir les traitements fongicides sur le rendement. En effet, durant des

années de faibles infestations correspondant aux années plus sèches, les études ont montré soit une absence d'effet des fongicides sur le rendement (Bailey et al. 2000), soit un effet positif des fongicides sur la répression des maladies et sur le rendement dans une moindre proportion (respectivement 1/4 et 2/4 des sites) (Wegulo et al. 2011). Au contraire, lors d'une année de plus forte infestation correspondant à une année pluvieuse, l'application de fongicides permettrait de réduire la gravité des maladies (taches bronzées, taches helminthosporiennes, fusariose, oïdium et rouille des feuilles) et d'augmenter les rendements pour tous les sites (Wegulo et al. 2011).

Brinkman et al. (2014) ont aussi observé des différences plus grandes entre des cultivars lorsque les conditions étaient favorables au développement des maladies. L'utilisation de fongicides foliaires pourrait alors devenir plus fréquemment rentable dans de telles conditions.

Moments d'application

Selon une étude suisse, les gains de rendements sont très variables d'une région à l'autre, mais aussi selon les moments d'application. En effet, des applications de fongicides foliaires dans le blé d'hiver entre les stades Zadoks 23 et 32 ont permis des gains de rendement dans moins de 25 % des cas. Des applications aux stades Zadoks 37 à 59 ont permis des gains de rendement dans 50 à 80 % des cas pour certaines régions, mais dans moins de 25 % des cas pour d'autres régions (Gindrat et al. 2004). Des applications plus tardives (stades Zadoks 61 à 69) ont permis des gains de rendement dans environ 60 % des cas pour la moitié des régions, mais les gains de rendement étaient quasiment nuls pour les autres régions. Au Danemark, des traitements fongicides effectués tôt en saison pour lutter contre *le Septoria* permettaient des gains de rendement potentiels de 270 à 590 kg/ha, mais un traitement effectué plus tard assurait des gains de rendement supérieurs variant de 0,64 à 1,20 t/ha (Jørgensen et al. 2008). Dans l'ensemble, l'application de fongicides au stade épiaison assurait un gain de rendement potentiel moyen de 1 t/ha. La meilleure période d'application se situerait entre les stades 37 et 65, avec un faible avantage pour un traitement effectué entre les stades 37 et 51. Des traitements plus hâtifs aux stades 29-31 seraient moins efficaces (Jørgensen et al. 2008).

En Grande-Bretagne, la réponse du rendement à différents traitements fongicides s'est avérée reliée à la sévérité de la maladie observée sur la deuxième feuille au moment de l'application (stade Zadoks 30-31) et au degré de répression du piétin-verse à la base des plants et des maladies foliaires sur la feuille étendard au stade 75 (Gladders et Hims 1994). Dans cette étude, une application de fongicides foliaires effectuée au stade 30-31 (premier nœud) sur de l'orge d'hiver a engendré un gain de rendement moyen de 0,86 t/ha (variation de 0,25 à 3,03 t/ha, soit de 4 à 80 %) (Gladders et Hims 1994). L'ajout d'un deuxième traitement effectué entre les stades 39-59 (ligule de la feuille étendard tout juste visible et épi tout juste complètement dégagé) a eu des résultats similaires avec un gain de rendement moyen de 1,25 t/ha (0,35 à 3,32 t/ha, soit 5 à 87 %); les différentes réponses observées à la suite du deuxième traitement étant dues aux différentes pressions des maladies. Durant les années de fortes infestations, les traitements effectués au stade 30-31 n'ont pas été efficaces pour maîtriser les maladies jusqu'au stade laiteux. En revanche, en cas de faible infestation au stade premier nœud décelable (stade 31), un seul traitement effectué au stade 33-37 a assuré les mêmes gains de rendement que deux traitements, d'où une meilleure rentabilité (Gladders et Hims 1994).

Dans une étude effectuée aux États-Unis, un traitement réalisé au stade 39 du blé assurait de meilleurs gains de rendement et des retours nets plus élevés. Les meilleurs résultats sont

observés avec l'application d'azoxystrobine + propiconazole au stade 39, de pyraclostrobine ou de propiconazole au stade 39, ou encore de trifloxystrobine + propiconazole au stade 31 et 39 (Wegulo et al. 2011). Au Canada, une étude a montré qu'un traitement au prothioconazole effectué au moment de l'application d'herbicides ou au stade feuille étandard permettait un gain de rendement de 14 %, alors que le gain de rendement était moindre (8 %) lorsque deux applications étaient effectuées (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2012). Dans une autre étude canadienne, des traitements fongicides effectués aux stades 39-49 ou 60-65 étaient efficaces dans l'ensemble puisqu'ils permettaient de réduire la sévérité des maladies fongiques. Pour certains sites, un traitement au stade 60-65 était toutefois trop tardif, car l'oïdium était déjà trop implanté dans la culture (Brinkman et al. 2014). Finalement, des traitements effectués aux stades 39-49 ou 60-65 plutôt que 29-32 présentent les réponses au rendement les plus stables, notamment si les traitements sont associés à une application d'azote (Brinkman et al. 2014).

Dans une revue de littérature effectuée par Poole et Arnaudin (2014), on conclut qu'une lutte préventive aux maladies fongiques dans les céréales est plus efficace qu'une lutte curative. En effet, les fongicides du groupe 3, par exemple, sont efficaces pour lutter contre la rouille jaune ou la septoriose de manière préventive, mais sont inefficaces si les maladies sont déjà présentes (Cook et al. 1999). De plus, l'application préventive peut être plus avantageuse lorsqu'un cultivar sensible est semé. En effet, dans ce cas-là, les fongicides présentent une meilleure efficacité quand l'application est effectuée à un stade de croissance précis (stades 31 à 37, élongation de la tige), plutôt que lorsque la maladie est détectée pour la première fois (Viljanen-Rollinson et al. 2010). En revanche, lorsqu'un cultivar modérément résistant est semé, la prophylaxie est moins nécessaire. En définitive, la décision doit donc reposer sur le cultivar utilisé, le stade de croissance, la présence de maladies et les conditions météorologiques. Selon Poole et Arnaudin (2014), il est préférable d'appliquer les fongicides dans les céréales avant que les tissus ne soient sévèrement atteints. Cependant, en cas d'infestation très précoce, on peut se questionner sur la pertinence d'effectuer des applications répétées pour lutter contre les maladies fongiques, car cela peut ne pas être économiquement rentable et induire des résistances chez les champignons (Poole et Arnaudin 2014).

Dans une étude effectuée au Royaume-Uni, l'application de prochloraz + carbendazim a permis de réduire les infestations de piétin-verse dans le blé et d'augmenter les rendements, et ce quelles que soient les dates d'application (Jones 1995). En effet, on observait dans l'ensemble une même efficacité entre les traitements pour une application aux stades 30-33 alors qu'une augmentation de rendement plus faible était observée pour des applications plus tardives (résultats moins constants lors d'une application aux stades 37-39). En particulier, lors d'années de fortes incidences de piétin-verse, des traitements fongicides (ex. prochloraz ou prochloraz + carbendazim) permettaient de réduire la gravité de la maladie et d'augmenter le rendement ainsi que le poids de 1 000 grains quelle que soit la date d'application, mais aucun effet sur la verse n'était toutefois observé (Jones 1995). Au contraire, lors d'années de faible incidence de piétin-verse, un traitement fongique (prochloraz ou prochloraz + carbendazim) n'induisait pas de différences de rendement ou de poids spécifique des grains. En ce qui concerne *le Septoria*, tous les traitements se sont avérés efficaces, mais un seul traitement de prochloraz effectué aux stades 37-39 était moins efficace que les autres traitements incluant celui de triadimenol + tridemorph + chlorothalonil (Jones 1995). Enfin, concernant la rouille jaune, des traitements fongicides effectués en présence de la maladie ont été rentables, permettant d'augmenter les rendements, le poids de 1 000 grains et le poids spécifique des grains (Jones 1995). Aucun

effet sur le rendement ou sur la rentabilité n'était observé pour un traitement effectué en absence de rouille.

Rentabilité économique

Au niveau économique, la rentabilité des traitements varie selon les années et les sites. Elle dépend également des potentiels de rendement, du prix des grains et de la présence et de l'intensité des maladies. En Suède, la rentabilité des traitements fongicides dans le blé d'hiver varie grandement selon le prix du grain, le coût des traitements et l'intensité des maladies (Wiik et Rosenqvist 2010). Pour un prix du grain faible (10 euros/100 kg), un traitement est rentable dans 28 à 77 % des cas selon les coûts des traitements (33-100 euros/ha), ce qui correspond à un gain de rendement minimal de 0,45 à 1,36 t/ha pour être rentable. Si le prix du grain est élevé (30 euros/100 kg), alors un traitement est rentable dans 82 à 91 % des cas, ce qui implique un gain de rendement minimal nécessaire moindre, soit de 130 à 370 kg/ha (Wiik et Rosenqvist 2010). Dans une étude effectuée au Luxembourg, l'application de fongicides foliaires a permis, dans l'ensemble, des gains financiers variant de 1 à 16 % (El Jarroudi et al. 2015). Cependant, même si un traitement fongicide était recommandé dans 65 % des cas, il n'y avait pas toujours de différences entre les parcelles traitées et les parcelles témoin, et aucune différence n'était observée entre 1, 2 ou 3 applications lorsqu'un traitement était recommandé. En Grande-Bretagne, les traitements fongicides sont plus fréquemment rentables lorsque l'intensité de *Septoria* ou de piétin-verse est élevée (Jones 1995). De manière générale, l'application préventive de strobilurines en Europe est recommandée par la FRAC (Fongicide Resistance Action Committee). Les traitements des champs de blé et d'orge avec des strobilurines permettraient ainsi d'assurer les rendements et la qualité des grains, ce qui permettrait de maintenir un revenu pour les producteurs qui font face à des difficultés économiques.

En Amérique du Nord, les gains de rendement et la rentabilité des traitements sont aussi variables selon les sites et les années, et en particulier selon l'intensité des maladies. Aux États-Unis par exemple, lors d'une année de faible infestation, une augmentation du rendement après l'application de fongicides a été observée pour 75 % des sites et la plupart des traitements assuraient un retour net positif. Cependant, pour 25 % des sites, une perte de rendement et un retour net négatif ont été observés (Wegulo et al. 2011). Les résultats variaient entre les sites et les traitements, avec des gains de rendement variant de -338 kg/ha à +1,46 t/ha et des retours nets variant de -101 à 172 \$/ha. Pour la moitié des sites, les meilleurs traitements incluaient l'application d'azoxystrobine + propiconazole au stade 31 (gains de 1,07 à 1,46 t/ha et de 117 à 172 \$/ha) ou aux stades 31 et 37 (gains de 1,43 à 1,67 t/ha et de 134-167 \$/ha). Lors d'une année de forte infestation, un gain de rendement et un retour net positif ont été observés pour tous les sites et traitements (Wegulo et al. 2011). Le gain de rendement et le retour net étaient toutefois plus faibles dans le cas d'un site fortement infesté par la fusariose. Dans l'ensemble, le gain de rendement obtenu à la suite d'un traitement fongicide variait de 0,622 à 2 060 t/ha, avec un retour net de 60 à 294 \$/ha (Wegulo et al. 2011).

La rentabilité des traitements dépend aussi grandement des cultivars. Au Danemark, Jørgensen et al. (2008) ont évalué que de deux à trois applications de fongicides étaient économiquement optimales pour lutter contre les maladies fongiques dans le blé lorsque des cultivars sensibles étaient semés, alors que pour des cultivars résistants, le seuil de rentabilité était d'une à deux applications. Aux États-Unis, Thompson et al. (2014) ont estimé un retour net de 6 à 116 \$/ha pour les cultivars sensibles, de -19 à 36 \$/ha pour les cultivars intermédiaires et de -28 à 36 \$ pour les cultivars résistants. Pour le blé d'hiver,

l'application de fongicides s'avère rentable lorsqu'un cultivar sensible est semé lors d'une pression modérée de fusariose. Toutefois, si la pression de la fusariose est plus élevée, une meilleure rentabilité serait obtenue en combinant cultivar résistant et fongicides (Ransom et McMullen 2008). Dans une autre étude effectuée aux États-Unis sur du blé rouge d'hiver, des applications de fongicides foliaires effectuées en l'absence de maladies fongiques n'étaient pas économiquement rentables. En considérant le coût du traitement, le prix du grain et le gain de rendement, la probabilité pour qu'un traitement soit rentable était inférieure à 50 %, et ce, même si des gains de rendement étaient observés (strobilurine : gain moyen de 110 kg/ha, variation de -370 à + 590 kg/ha; propiconazole : gain moyen de 150 kg/ha, variation de -540 à + 870 kg/ha) (Weisz et al. 2011). En revanche, lorsque des maladies fongiques sont bien présentes, il y a une probabilité supérieure à 50 % de dépasser le seuil de rentabilité si une application de fongicides est effectuée, avec des gains de rendement moyen de 440 kg/ha (strobilurine) à 570 kg/ha (propiconazole).

L'interaction fongicide et azote observée dans certaines études peut également avoir des répercussions sur la rentabilité des traitements. En effet, dans une étude effectuée en Angleterre, un traitement fongicide effectué lorsque la feuille étendard était complètement déployée (stade Zadoks 39) et à la suite d'une application d'azote permettait d'augmenter les marges brutes de 10 à 41 % lors d'une application d'azote en mars et de 21 à 51 % lors d'une application en avril comparativement à des champs ayant reçu une application d'azote en mars et aucun fongicide (Jordan et Stingham 1988). Bien qu'aucune interaction fongicide et fertilisation n'ait été observée dans leur étude, Karamanos et al. (2012) ont calculé un bénéfice de près de 20 \$/ha en moyenne pour différents prix de l'orge et des traitements fongicides avec une fertilisation azotée supérieure à 70 kg/ha. Le bénéfice calculé était de 22 \$/ha pour un prix de l'orge et un potentiel de rendement élevés alors qu'une perte de 7 \$ pouvait être observée pour les sites possédant un potentiel de rendement plus faible.

Au Québec, l'application de fongicides foliaires dans les céréales a montré un effet globalement positif sur les rendements, mais peu d'effet sur la teneur en DON (Belzile et Grondines 2015). Cependant, les résultats variaient selon les cultures. Dans le blé, l'application de fongicides foliaires a montré de meilleurs résultats et s'est avérée rentable pour certains produits générant des marges sur coûts variables de 45 à 108 \$/ha, alors que l'application de fongicides foliaires n'était pas rentable dans l'orge (marges sur coûts variables négatives ou ne dépassant pas 2 \$/ha) (Belzile et Grondines 2015). Dans l'avoine, bien que des traitements n'aient pas permis de réduire les teneurs en DON, des marges sur coûts variables de 13 à 23 \$/ha ont été toutefois observées (Belzile et Grondines 2015). Ces résultats d'essais effectués au Québec montrent que les fongicides foliaires ne peuvent pas, à eux seuls, permettre de lutter adéquatement contre la fusariose.

Dans la documentation en économie agricole, les pesticides sont reconnus comme un intrant qui protège les rendements potentiels plutôt que de les augmenter. Ainsi, il s'agit davantage d'un outil de gestion du risque que d'un intrant conventionnel. Dans cette perspective, la tolérance au risque des producteurs est un facteur déterminant. S'il y a surestimation du risque, le producteur risque d'entreprendre des traitements phytosanitaires inutiles et alors, détériorer la rentabilité de l'entreprise. C'est ce que tendent à démontrer Belzile et Grondines (2015). Par ailleurs, des risques environnementaux supplémentaires associés à des traitements inutiles s'ajoutent à la perte de rentabilité à l'échelle de la ferme. Ces risques pour l'environnement et pour la santé se traduisent ensuite en coûts sociaux. Par conséquent, l'utilisation préventive plutôt que curative des fongicides foliaires ne se justifie pas sur les plans autant économique que social (Belzile 2016).

Effets indésirables

Des champignons résistants aux fongicides dans les céréales à paille ont été répertoriés en Europe (de Bastard et al. 2015). Ces résistances concernent la septoriose, l'oïdium, le piétin-verse, l'helminthosporiose du blé et de l'orge, la rhynchosporiose de l'orge ou encore la fusariose des céréales.

Effets sur l'environnement et sur la santé humaine

La toxicité des fongicides foliaires utilisés dans les céréales (familles des strobilurines, triazoles, pyrazoles, dithiocarbamates ou chloronitriles) varie de faible à élevée (SAGÉ pesticides 2015). Pour ce qui est de la toxicité à long terme, elle est dans l'ensemble faible pour les strobilurines (faible à modérée), mais elle est beaucoup plus élevée pour les fongicides appartenant aux autres familles (toxicité élevée, extrêmement toxique, possiblement cancérigène et perturbateur endocrinien). La persistance dans le sol et le lessivage sont très variables selon les molécules, leur valeur allant de faible à élevée. Enfin, concernant la toxicité envers les organismes non visés, les fongicides foliaires utilisés dans les céréales ont dans l'ensemble une faible toxicité pour les abeilles (faible à légère), mais présentent une plus grande toxicité pour les organismes aquatiques (oiseaux et daphnies, toxicité élevée à extrêmement élevée).

Solutions alternatives aux fongicides foliaires

L'utilisation de cultivars résistants aux maladies fongiques constitue une solution alternative à l'application des fongicides foliaires. Le Réseau grandes cultures du Québec (RGCQ) publie annuellement des données relatives à la sensibilité de plusieurs maladies touchant les céréales (avoine, blé, orge, seigle et triticales).

La rotation des cultures aurait dans l'ensemble un effet significatif sur la gravité des maladies et le rendement en grains (Rioux et al. 2013; Bailey et al. 2000). De meilleurs rendements seraient obtenus dans une rotation de quatre ans si elle est réalisée en incluant une plus grande diversité de cultures et des cultures à feuilles larges (ex. canola, pois, lin, orge) comparativement à une rotation où il y aurait une plus faible diversité de cultures et moins de cultures à feuilles larges (ex. canola, blé, orge, orge) (Bailey et al. 2000). Selon une autre étude, il n'y aurait pas d'effet des rotations sur la sévérité des maladies foliaires et le rendement, mais il existerait un effet positif sur le taux de protéines des grains qui serait supérieur lorsque le blé suit le pois (Kutcher et al. 2011). La rotation aurait toutefois un impact positif dans une culture intensive d'orge. Il existerait également une interaction rotation et fongicide, de sorte que l'intensité des maladies serait réduite après l'application de fongicides si le blé suit le canola (Kutcher et al. 2011). Il existerait également une interaction plus complexe fongicide et travail de sol et rotation (Bailey et al. 2000; Kutcher et al. 2011). Selon Jørgensen et al. (2008), le rendement dans le blé serait affecté par la région, le type de sol et le précédent cultural. De meilleurs rendements seraient obtenus dans les champs traités ou non traités aux fongicides si le précédent cultural est du pois ou du canola comparativement à des céréales ou d'autres cultures. Cependant, même si l'effet des fongicides est variable selon les régions, celui-ci ne serait pas influencé par le type de sol et le précédent cultural (Jørgensen et al. 2008). Comme mentionné dans le paragraphe précédent, l'utilisation de cultivars plus résistants constitue une solution alternative à l'application de fongicides foliaires.

Maladies fongiques retrouvées au Québec

Le tableau 1 présente la synthèse des effets de différentes méthodes de lutte contre les maladies fongiques dans les céréales.

Les lecteurs sont invités à consulter les documents suivants pour de plus amples informations :

- Guide de production - Les céréales à paille, édité par le CRAAQ (2012) (<https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/guide-de-production-les-cereales-a-paille/p/PCER0101>) ;
- Maladies des grandes cultures au Canada, édité par la société canadienne de phytopathologie (2004) et les « Canadian Plant Disease Survey » publiés annuellement.

Rouilles des céréales

Plusieurs types de rouille sont observés au Canada : la rouille des feuilles ou rouille brune (*Puccinia triticinia*), la rouille des tiges ou rouille noire (*Puccinia graminis*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et la rouille couronnée (*Puccinia coronata*, *Puccinia coronata* var. *avenae* dans le cas de l'avoine). Les champignons responsables de la rouille brune et de la rouille jaune n'hivernent pas au Canada, alors que ceux responsables de la rouille noire et de la rouille couronnée hivernent respectivement sur l'épine-vinette et le nerprun commun (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b; MAAARO 2009). En ce qui concerne la rouille jaune, il est rapporté qu'elle peut toutefois hiverner sur le blé d'automne dans certaines régions du Canada lorsque l'hiver est doux (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010b) ou lorsque le couvert de neige est suffisant (Gagnon et al. 2014).

Les pertes de rendement dues aux différentes rouilles sont généralement faibles, mais des infections hâtives peuvent engendrer plus de pertes (MAAARO 2009). En effet, les maladies sont plus dommageables lorsqu'elles surviennent avant la floraison et lorsque la feuille étandard est atteinte (Lipps 1996 a). De ce fait, des pertes de rendement et de qualité des grains peuvent être observées (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010b). Les intensités de rouille pourraient dépendre aussi de la date de semis, puisque les semis d'automne peuvent présenter plus de symptômes que ceux de printemps (cas de la rouille jaune en Nouvelle-Zélande, Viljanen-Rollinson et al. 2010). La rouille des feuilles est la plus fréquente au Canada. Son incidence est variable selon les années, mais elle engendre généralement peu de pertes économiques (MAAARO 2009). Quant à la rouille noire, son incidence est faible, sauf si de l'épine-vinette se trouve à proximité (MAAARO 2009). Elle peut causer des pertes de rendement (réduction du tallage et du nombre de grains/épi) ainsi qu'une perte de qualité des grains. L'incidence de la rouille jaune est en croissance au Canada depuis les dernières années (MAAARO 2009) et sa présence au Québec remonte à 2013 (Gagnon et al. 2014). Elle cause une diminution de la photosynthèse et possiblement des pertes de rendement. Enfin, la rouille couronnée est une maladie qui touche surtout les champs d'avoine dans l'Est de l'Ontario (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009) et au Québec (Rioux 2015), pouvant occasionner d'importantes pertes de rendement.

Plusieurs cultivars de céréales sont résistants aux différentes rouilles. Par exemple, la plupart des cultivars de blé sont très résistants à la rouille noire et quelques cultivars de blé ou d'avoine sont également résistants à la rouille jaune, mais peu de cultivars de blé blanc sont résistants à la rouille brune (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b). Même s'il existe des cultivars résistants, aucun n'est résistant à toutes les rouilles et l'on

note l'apparition constante de nouvelles races de rouilles virulentes, faisant en sorte qu'un cultivar résistant peut devenir sensible après quelques années (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010b; Lipps 1996 a). En effet, selon Lipps (1996a), la durée de vie d'un cultivar résistant serait de 2 à 4 ans. Toutefois, l'utilisation de cultivars résistants demeure une bonne méthode de lutte, notamment pour lutter contre la rouille jaune comme en témoigne une étude effectuée en Nouvelle-Zélande. Les cultivars résistants utilisés dans cette étude étaient exempts de rouille, et ce, même en absence de fongicides (Viljanen-Rollinson et al. 2010), alors que deux à quatre applications de fongicides étaient nécessaires pour lutter contre la rouille jaune (Viljanen-Rollinson et al. 2010).

Les méthodes de lutte contre les différentes rouilles des céréales passent par le choix de cultivars résistants tel que vu précédemment, mais aussi par un semis hâtif ou l'utilisation de fongicides foliaires lorsque les seuils sont atteints (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b; Duveiller et al. 2007; Lipps 1996a; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009; Viljanen-Rollinson et al. 2010). Une fertilisation équilibrée sans excès d'azote réduit aussi les risques d'avoir des pertes de rendement. En effet, d'importantes pertes de rendement peuvent survenir si l'apport en azote est trop élevé par rapport au phosphore et au potassium (Lipps 1996a). Dans le cas de la rouille noire dont le champignon hiverne sur l'épine-vinette ou de la rouille couronnée dont le champignon hiverne sur le nerprun, l'élimination de ces arbustes peut aussi jouer un rôle dans la réduction des infestations (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009).

En Ohio, l'application de fongicides foliaires est préconisée si le champ possède un haut potentiel de rendement, si le cultivar est sensible, si l'inoculum arrive tôt en saison et si la feuille étendard est sur le point d'être déployée (Lipps 1996 a). Au Canada, l'application de fongicides doit être effectuée entre les stades sortie de l'épi et la fin de la floraison, si la feuille de l'épi possède 5 à 10 pustules ou si l'on observe 1 % de la surface foliaire atteinte et qu'un temps humide ou pluvieux est prévu (MAAARO 2009). Pour ce qui est de la rouille jaune sur le blé au Québec, il est recommandé d'intervenir lorsque 5 % des feuilles du champ sont atteintes, mais l'intervention doit toutefois être réalisée avant que 5 % de la surface de la feuille étendard soit atteinte, ce qui correspond à 4 lésions d'au moins 1 cm (Gagnon et al. 2014). En revanche, dans les champs d'orge, l'application d'un fongicide foliaire doit être effectuée le plus tôt possible après l'apparition de la maladie, soit près du moment de la sortie de la feuille de l'épi (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009).

Plusieurs fongicides peuvent être utilisés pour lutter contre les différentes rouilles. En France, où aucune résistance aux strobilurines ou triazoles n'est connue à ce jour, les recommandations sont d'associer des fongicides appartenant à ces deux familles (de Bastard et al. 2015). Aux États-Unis, plusieurs fongicides présentent une efficacité allant de très bonne à excellente pour lutter contre la rouille brune, jaune ou noire (Wise 2014). Au Canada, plusieurs molécules sont homologuées pour lutter contre les différentes rouilles (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b): tébuconazole, azoxystrobine, trifloxystrobine, pyraclostrobine, metconazole + pyraclostrobine (rouille brune et jaune), metconazole, propiconazole, prothioconazole (rouille brune), tébuconazole + trifloxystrobine ou prothioconazole + tebuconazole (rouille brune, noire ou jaune).

[Taches bronzées \(*Pyrenophora tritici-repentis*\)](#)

Le champignon responsable des taches bronzées hiverne au Canada dans le sol, les résidus des cultures (ex. blé) et moins fréquemment dans les semences (Agriculture et

Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b; Duveiller et al. 2007; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). La maladie des taches bronzées a une faible incidence économique au Canada, mais elle est souvent confondue avec la maladie des taches septoriennes d'où une application souvent inutile de fongicides (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). Des pertes de rendement peuvent survenir, de même qu'une perte de la qualité des grains pouvant engendrer un déclassement (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b). À titre d'exemple, des pertes de rendements de 10 à 20 % ont été rapportées au Brésil, au Paraguay et en Argentine (Annone 1998, lu dans Duveiller et al. 2007).

Les méthodes de lutte incluent le travail du sol, l'enfouissement des résidus de cultures et la rotation des cultures (ex. maïs, soya, luzerne ou céréales autres que le blé), l'utilisation de cultivars résistants ou encore l'application de fongicides foliaires (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b; Duveiller et al. 2007; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). Afin de réduire les baisses de rendement, la répression de la maladie doit s'effectuer avant que la dernière feuille ne soit touchée (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010b).

Plusieurs matières actives offrent une excellente efficacité contre les taches bronzées (Wise 2014). Au Canada, les molécules homologuées incluent le tébuconazole, azoxystrobine, trifloxystrobine, pyraclostrobine, metconazole, propiconazole, prothioconazole, metconazole + pyraclostrobine, tébuconazole + trifloxystrobin et prothioconazole + tebuconazole (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b).

[Taches septoriennes/septoriose \(*Septoria tritici*\), moucheture \(*stagonosporose*\) et tache des glumes \(*Stagonospora nodorum*\)](#)

Les champignons responsables de ces maladies hivernent au Canada dans le sol, les résidus des cultures (chaume, paille, repousses de blé), les semis de blé d'automne ou encore dans les semences (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b ; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). Ils peuvent survivre jusqu'à 3 ans sur les chaumes à la surface du sol (Lipps et Mills 2002). Les deux champignons sont favorisés par un temps humide (ex. au moins 6 heures de mouillage des feuilles), mais *S. nodorum* tolère des températures plus élevées (20-27 °C) que *S. tritici* (15-20 °C) (Duveiller et al. 2007; Lipps et Mills 2002; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009).

Selon Duveiller et al. (2007), la maladie des taches septoriennes représente la maladie du blé la plus sérieuse dans les régions tempérées et humides pendant la saison de croissance du blé. En Ohio, sa présence est rapportée dans presque tous les champs de blé (Lipps et Mills 2002); les infestations de *S. nodorum* sont les plus importantes, alors que celles de *S. tritici* ne causent des pertes de rendement qu'occasionnellement. Une proportion de plus de 3 % de grains infestés contribue à l'infection des plantules à l'automne et au développement de la maladie au printemps suivant (Lipps et Mills 2002). Des conditions climatiques favorables à la dissémination de l'inoculum au printemps peuvent causer de sérieuses pertes de rendement, pouvant atteindre 20-30 % par temps humide et venteux (Lipps et Mills 2002). Plus de dommages surviennent lorsque la feuille étendard et les deux feuilles en dessous de celle-ci sont affectées au moment de la floraison (Lipps et Mills 2002). Au Canada, la maladie des taches septoriennes peut occasionner des pertes de rendement et avoir des incidences économiques (surtout dans le blé), d'autant plus si une période de pluie prolongée est observée (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b). Cette maladie peut également provoquer une altération de la qualité des grains, entraînant

possiblement un déclassement (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b). *Septoria tritici* est plus abondant en début de saison (entre l'élongation de la tige et l'émergence de la feuille étendard), alors que la sensibilité des plants à *S. nodorum* est plus grande durant les stades de croissance avancés (Duveiller et al. 2007; Lipps et Mills 2002).

Certains cultivars de blé roux de printemps de l'Ouest canadien et de blé roux de printemps des Prairies offrent une bonne résistance aux taches septoriennes et moucheture des glumes, mais la résistance est limitée pour les autres types de blé (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010b). Aucun cultivar résistant n'est répertorié pour le blé d'automne (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010 a). Selon Lipps et Mills (2002), il n'existe pas de cultivar totalement résistant à ces maladies, mais le choix de cultivars possédant un bon niveau de résistance permet de réduire les pertes de rendement en cas d'infestation. De plus, un cultivar résistant aux taches septoriennes peut être sensible à la tache des glumes et inversement, mais il est possible de sélectionner des cultivars ayant une résistance modérée aux deux maladies (Lipps et Mills 2002). Dans le cas des taches septoriennes, l'utilisation de cultivars résistants peut permettre de réduire l'utilisation de fongicides coûteux (Duveiller et al. 2007). Toutefois, le recours à des cultivars résistants a des limites puisque le champignon possède une grande diversité génétique et se reproduit de manière sexuée plusieurs fois pendant la saison, augmentant ainsi les chances de contrer la résistance des plantes (Duveiller et al. 2007).

Outre l'utilisation de cultivars résistants, les méthodes de lutte incluent la rotation des cultures (ex. semis de blé seulement 1 année sur 3), l'enfouissement des résidus de cultures et la destruction des repousses spontanées (blé, orge, seigle, graminées sauvages), l'utilisation de semences saines, ainsi que l'application de fongicides soit en traitement de semences soit en application foliaire (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b; Lipps et Mills 2002; MAAARO 2009). Un semis tardif et une fertilisation équilibrée peuvent réduire aussi les infestations (Lipps et Mills 2002; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). En effet, une fertilisation trop riche en azote peut augmenter les risques de dommages dus à *S. nodorum* (Lipps et Mills 2002).

En cas de maladie, un traitement de fongicide foliaire est recommandé si une ou deux lésions (équivalent à 1 % de la surface de la feuille) sont présentes sur la première feuille se trouvant sous la feuille de l'épi ou si une à deux lésions (1 % de la surface de la feuille) sont présentes sur la feuille de l'épi pendant l'épiaison (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). La perte de rendement peut être contrée en réprimant les maladies avant qu'elles n'atteignent la dernière feuille (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b). Aux États-Unis, plusieurs fongicides ont une très bonne efficacité contre ces deux maladies (Wise 2014). Au Canada, les traitements recommandés sur le blé de printemps ou sur le blé d'automne incluent de l'azoxystrobine (*S. tritici*), pyraclostrobine, tébuconazole, metconazole, propiconazole, prothioconazole, pyraclostrobine + metconazole, trifloxystrobine + tébuconazole (*S. nodorum*) ou prothioconazole + tébuconazole (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b).

Des résultats contradictoires sont observés quant aux effets des fongicides pour lutter contre les taches septoriennes. En effet, selon Bartlett et al. (2002), l'azoxystrobine, la trifloxystrobine, la picoxystrobine et la pyraclostrobine seraient efficaces contre *le Septoria*, avec une réduction de la maladie de 70 à 90 % contre 45 % avec du tébuconazole. Mais, selon une autre étude, les fongicides de la famille des strobilurines seraient inefficaces pour lutter contre les taches septoriennes (Duveiller et al. 2007). Par ailleurs, une étude française rapporte au contraire que ce sont les fongicides de la famille des triazoles (époconazole, prothioconazole, metconazole) qui seraient les plus efficaces contre la septoriose (de

Bastard et al. 2015). Dans cette étude, il est également rapporté des cas de résistances aux strobilurines et triazoles dans l'ensemble des régions françaises, d'où l'intérêt d'alterner les matières actives pour réduire la pression de sélection de variétés de champignon résistantes.

Oïdium (*Blumeria graminis*)

Le champignon hiverne dans les résidus de cultures (paille, chaumes, plantules de céréales semées à l'automne, repousses de céréales), les semis de blé d'automne infestés ou les repousses spontanées (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a; Lipps 1996 b; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). L'oïdium est une maladie importante du blé à travers le monde (Duveiller et al. 2007) et en Ohio par exemple, elle représente la maladie la plus commune du blé depuis les 20 dernières années (Lipps 1996b). Elle est plus dommageable durant les années où un climat doux est observé en avril-mai. En effet, le champignon est favorisé par des conditions humides et des températures douces (Lipps 1996b; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009) et cesse son développement lorsque les températures dépassent 25 °C (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010 a).

La maladie peut affecter le blé ou l'orge, mais a peu d'impact sur le seigle ou l'avoine (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). De graves infestations provoquent la verse et le mauvais remplissage des grains (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). L'oïdium peut aussi provoquer une réduction de la photosynthèse, du nombre de talles, du nombre de grains/épi et de la taille et du poids des grains (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010 a; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009).

L'incidence sur le rendement est difficilement prévisible, mais est généralement peu importante pour des infestations hâtives alors que des infestations plus tardives atteignant la feuille de l'épi et la deuxième feuille ont des conséquences plus graves (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010 a; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). En effet, des pertes de rendement plus grandes surviennent lorsque la maladie atteint le haut de la plante avant le stade de floraison, notamment lorsque la feuille étendard est atteinte (Lipps 1996b). Par exemple, des pertes de rendement jusqu'à 45 % ont été observées en Ohio lorsqu'un cultivar sensible avait été semé, que la maladie se manifestait tôt en saison et que des conditions favorables au développement de la maladie étaient observées (Lipps 1996b). Dans l'ensemble, des pertes de rendement de 2 à 30 % ont été rapportées au Canada, mais les pertes dépassent rarement 10 à 15 % en Ontario (MAAARO 2009). Au Québec, la maladie a une faible incidence sur le blé (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b).

La méthode de lutte contre l'oïdium la plus économique, mais aussi la moins dommageable pour l'environnement, demeure l'utilisation de cultivars résistants (Duveiller et al. 2007; Lipps 1996 b). Au Canada, des cultivars très résistants de seigle ou d'avoine et des cultivars résistants de blé d'automne sont disponibles (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010 a; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). Cependant, malgré l'existence de différents cultivars résistants, on voit apparaître de nouvelles races d'oïdium s'attaquant aux cultivars résistants (Lipps 1996b).

Hormis l'utilisation de cultivars résistants, les méthodes de lutte contre l'oïdium incluent : la rotation des cultures (au moins 2 ans sans cultures sensibles ou des plantes non-hôtes), le

travail du sol, l'enlèvement des résidus de culture et les repousses spontanées (spécialement dans les champs où il existe un historique de maladie), une fertilisation équilibrée avec un apport en azote pas trop élevé, un peuplement peu dense et l'application de fongicides foliaires (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010 a; Lipps 1996 b; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009).

En Ontario, un traitement fongique foliaire contre l'oïdium est recommandé si les seuils de nuisibilité sont atteints soit en début de saison, lorsque de 5 à 10 % de la surface des feuilles inférieures sont infestées. Plus tard en saison, une intervention immédiate est recommandée lorsque les symptômes atteignent 1 % de la surface de la feuille de l'épi ou 3 à 5 % de la surface de la 2e feuille et lorsqu'un temps pluvieux ou humide est prévu sur une longue période (MAAARO 2009). Aux États-Unis, quelques produits offrent une très bonne efficacité contre l'oïdium dans les champs de blé, alors que d'autres ont une efficacité un peu moindre, mais tout de même qualifiée de bonne (Wise 2014). Au Canada, les applications de pyraclostrobine, trifloxystrobine, tébuconazole, propiconazole, prothioconazole, triadiménol, pyraclostrobine + metconazole, trifloxystrobine + tébuconazole ou prothioconazole + tébuconazole (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b) sont homologuées. Il faut toutefois noter que des souches d'oïdium résistantes aux strobilurines ont été répertoriées (Bartlett et al. 2002; de Bastard et al. 2015).

Chez l'orge, des études effectuées en Suède (Hysing et al. 2012) ont montré que des gènes de résistance à l'oïdium étaient associés à des réductions significatives de la maladie (38-99 %), au même titre que des traitements fongicides (50-97 %). Cependant, en comparaison avec l'utilisation de lignées résistantes seules, les traitements fongicides augmentaient les rendements de 11 à 17 %, le poids de 1 000 grains de 6 à 10 %, le poids volumique des grains de 2 à 4 % et la teneur en eau de 8 à 13 %, mais n'avaient pas d'effet sur la rigidité des tiges (Hysing et al. 2012). Selon cette étude et d'un point de vue agronomique, l'application de fongicides serait donc plus efficace que l'utilisation de cultivars résistants, mais les traitements fongicides contre l'oïdium ne seraient rentables que lorsque le prix du grain est élevé.

[Fusariose de l'épi \(*Fusarium graminearum* et *Fusarium spp.*\)](#)

Fusarium graminearum est la principale espèce de champignon pouvant causer la fusariose. Il peut infecter le maïs, le blé, l'orge, l'avoine et le seigle. Tous les champignons responsables de la fusariose passent l'hiver au Canada (sous forme de spores, mycéliums ou organes de fructification) dans les grains infestés, les chaumes et autres résidus de cultures à la surface du sol (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). La fusariose est une des maladies les plus répandues en Ontario qui provoque de lourdes pertes de rendement et la production de mycotoxines (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). Elle a également une incidence importante au Québec (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010 a; CRAAQ 2012). Selon Duveiller et al. (2007), la rotation des cultures de blé avec du maïs ou une autre céréale dans les systèmes en semis direct serait un facteur aggravant l'incidence de la maladie. La fusariose peut causer des pertes de rendement et une altération de la qualité des grains à cause de la présence de désoxynivalénol (DON) ou de vomitoxine (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010b; CRAAQ 2012).

La lutte contre la fusariose passe avant tout par la rotation des cultures (ne pas semer du blé après du blé ou du maïs et privilégier des plantes non hôtes), mais aussi par un travail du sol, l'enfouissement des résidus de culture, le contrôle des mauvaises herbes pouvant être

des plantes hôtes (ex. chiendent et le pied-de-coq), l'utilisation de semences saines et une bonne pratique d'entreposage et de séchage des grains (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). Au Québec, on préconise plutôt de combiner tous les moyens de lutte disponibles (CRAAQ 2012) pour lutter efficacement contre la fusariose.

Au Canada, la plupart des cultivars de blé de printemps ont une faible résistance à la fusariose, mais les cultivars de blé roux de printemps sont moins sensibles à la maladie que d'autres classes de blé de printemps ou de blé dur (certaines sont même modérément résistantes) (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010b). La plupart des cultivars de blé d'automne sont sensibles à la fusariose, mais il existe cependant quelques cultivars plus résistants (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010 a). Les guides du RGCQ (CÉROM 2015) constituent des documents forts utiles pour vérifier les niveaux de résistance des cultivars de céréales.

Quelques fongicides foliaires peuvent être utilisés pour lutter contre la fusariose (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b). Ainsi, un traitement au metconazole, au prothioconazole, ou au prothioconazole + tébuconazole offrent une bonne efficacité contre la fusariose dans les champs de blé (Rioux et al. 2013; Wise 2014). Au Canada, les traitements au chlorthalonil, au prothioconazole, au tébuconazole ou au prothioconazole + tebuconazole sont homologués (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010a, 2010b).

[Piétin-verse \(*Tapesia yellundae*\) et Rhizoctone ocellé \(*Rhizoctonia cerealis*\)](#)

Ces deux champignons hivernent au Canada sur les résidus de végétaux infestés sur une période minimale de trois ans (piétin-verse) ou dans le sol et sur les résidus des cultures (rhizoctone) (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). L'incidence de ces deux maladies est plus grande dans les régions dominées par les cultures céréalières. Le blé d'automne est plus sensible que les céréales de printemps. Les infestations sont plus sévères en sol léger, acide ou sec lorsque le printemps est frais ou lorsque les chaumes sont laissés à la surface du sol (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). L'incidence du rhizoctone peut être plus importante si le semis est hâtif et profond (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009).

Les méthodes de lutte incluent la rotation des cultures (ne pas semer de céréales deux années consécutives et laisser au moins deux ans entre deux cultures de céréales), l'enfouissement des résidus de cultures, le semis tardif et superficiel, ou encore l'utilisation de fongicides (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009).

[Rayure réticulée de l'orge \(*Pyrenophora teres*, anamorphe *Drechslera teres*\) et Rhynchosporiose \(*Rhynchosporium secalis*\)](#)

Plusieurs cas de résistance aux fongicides du champignon responsable de l'helminthosporiose de l'orge ont été observés en France. Cette résistance touche les fongicides de la famille des strobilurines (surtout azoxystrobine, pyraclostrobine moins affectée, situation intermédiaire pour les picoxystrobines et trifloxystrobines) ainsi que le cyprodinil et les carboxamides. Le fongicide le plus efficace contre l'helminthosporiose de l'orge serait donc le prothioconazole (de Bastard et al. 2015). Les recommandations actuelles sont d'associer des carboxamides ou strobilurines avec des fongicides efficaces ayant d'autres modes d'action (ex. prothioconazole ou cyprodinil), mais surtout d'alterner les fongicides utilisés (diversifier les modes d'action). Des cas de résistance aux strobilurines

ont également été observés chez des champignons responsables de la rhynchosporiose en France. Dans ce cas-ci, les recommandations sont d'associer des triazoles à un fongicide efficace ayant un autre mode d'action (de Bastard et al. 2015).

Tableau 1 : Effets de différentes méthodes de lutte contre les maladies fongiques des céréales

Méthode de lutte	Maladies foliaires en général	Rouille des céréales	Taches bronzées	Septoriose, Moucheture/ taches des glumes	Fusariose de l'épi	Helminthosporiose	Oïdium	Piétin-verse et Rhizoctone ocellé
Fongicides foliaires	+	+	+	+	±	±	+	±
Traitement des semences	ND	ND	ND	+	-	ND	ND	+
Agents de lutte biologique	ND	ND	ND	ND	ND	+	ND	ND
Cultivars plus résistants	+	+	+	±	+	+	+	ND
Rotation des cultures	+	ND	+	+	+	+	+	+
Élimination des résidus de cultures, semis direct et travail du sol	±	0	±	±	±	+	±	+
Date de semis	ND	+	ND	+	±	ND	ND	+
Fertilisation équilibrée (sans excès de N)	ND	+	ND	+	ND	ND	+	ND
Peuplement peu dense	ND	ND	ND	ND	ND	ND	+	ND
Maîtrise des mauvaises herbes pouvant être des plantes hôtes	ND	ND	ND	ND	+	ND	ND	ND
Bonne pratique d'entreposage et de séchage des grains	ND	ND	ND	ND	+	ND	ND	ND

+ : effet positif (méthode efficace contre la maladie), 0 : sans effet (non efficace), ± : effet mitigé ou sans incidence économique notable, - : effet négatif (favorise le développement de la maladie), ND : non documenté

Littérature citée

Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2010a. Profil de la culture du blé d'automne au Canada, 2010. pp. 77

Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2010 b. Profil de la culture du blé de printemps au Canada, 2010. pp. 72

Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2012. Maximizing Benefits from Foliar Fungicides on Wheat and Barley. Agricultural Demonstration of Practices and Technologies, 6 p. Disponible à l'adresse: <http://www.conservationlearningcentre.com/Portals/0/Projects/2012/Fungicide%20wheat%20and20barley%2020110365.pdf>

Ali M.A., Hussain M. et Khan M.I. 2011. Source-sink relationship between photosynthetic organs and grain yield attributes during grain filling stage in spring wheat (*Triticum aestivum*). *Int J Agric Biol* 12: 509-515.

Bailey K.L., Johnston A.M., Kutcher H.R., Gossen B.D. et Morrall R.A.A. 2000. Managing crop losses from foliar diseases with fungicides, rotation, and tillage in the Saskatchewan Parkland. *Can. J. Plant Sci.* 80(1):169-175.

Bartlett D.W., Clough J.M., Godwin J.R., Hall A.A., Hamer M. et Parr-Dobrzanski B. 2002. The strobilurin fungicides. *Pest Management Science* 58 (7):649-662.

Belzile L. 2016. Utilisation des fongicides foliaires en grandes cultures (volet économique). Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 19 p. Disponible à l'adresse : <http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/rapportfinalfongicidesfoliairesgrandescultures.pdf>

Belzile L et Grondines H. 2015. Les essais de fongicides foliaires pour lutter contre la fusariose dans les céréales à paille. *Perspectives en économie de l'agroenvironnement* 1 (2):3-4.

Bockus W.W., Appel J.A., Bowden R.L. 2001. Success stories: breeding for wheat disease resistance in Kansas. *Plant Disease* 85:453-461.

Brinkman J.M.P, Deen W., Lauzon J.D. et Hooker D.C. 2014. Synergism of nitrogen rate and foliar fungicides in soft red winter wheat. *Agron. J.* 106(2):491-510.

Castle E. N., Becker M.H. et Nelson A.G. 1987. *Farm Business Management – The Decision- Making Process*. Macmillan Publishing Company. 413 pages.

CÉROM. 2015. Céréales à paille 2015. Dans : Guide RGCQ 2016. Grandes cultures, décembre, pages 42-53.

Cook R.J., Hims M. J. et Vaughan T. B. 1999. Effects of fungicide spray timing on winter wheat disease control. *Plant Pathology* 48(1):33-50.

CRAAQ. 2012. Les céréales à paille : guide de production. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 148 pages.

de Bastard L., Beauvallet G., Champroux G. 2015. Note commune - Résistances aux fongicides - Céréales à pailles. Groupe Résistance aux fongicides, INRA, ANSES, ARVALIS - Institut du Végétal, 12 p. Disponible à l'adresse : http://www.france-comte.chambagri.fr/fileadmin/images_docs/images_docs_contenu/Gestion_des_resistances_aux_fongicides.pdf

Duveiller E., Singh R.P. et Nicol J.M. 2007. The challenges of maintaining wheat productivity: Pests, diseases, and potential epidemics. *Euphytica* 157(3):417-430.

El Jarroudi M., Kouadio L. et Beyer M. 2015. Economics of a decision-support system for managing the main fungal diseases of winter wheat in the Grand-Duchy of Luxembourg. *Field Crops Res.* 172:32-41.

Gagnon A.É., Rioux S., Colton-Gagnon K. et Dion Y. 2014. La rouille jaune du blé : un nouvel envahisseur au Québec. Réseau d'avertissements phytosanitaires - Grandes cultures - Avertissement n° 23 - 8 juillet 2014. Agri-réseau, Québec, 5 p. Disponible à l'adresse : <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/a23gc14.pdf>

Gindrat D., Frei P. et Pellet D. 2004. Rentabilité des fongicides sur le blé d'automne. *Revue suisse d'agriculture* 36 (3):117-125.

Gladders P. et Hims M. J. 1994. Improving spring and summer fungicide treatments for winter barley. *Crop Prot.* 13(8):597-606.

Hansen J.G., Secher B.J.M, JØRgensen L.N. et Welling B. 1994. Thresholds for control of *Septoria* spp. in winter wheat based on precipitation and growth stage. *Plant Pathology* 43(1):183-189.

Hardwick N.V., Jones D.R. et Slough J.E. 2001. Factors affecting diseases of winter wheat in England and Wales, 1989–98. *Plant Pathology* 50(4):453-462.

HGCA. 2011. The HGCA wheat disease management guide 2011. Home Grown Cereals Authority(HGCA Publication), Warwickshire, p. Disponible à l'adresse : http://adlib.everysite.co.uk/resources/000/160/665/G38_Wheat_Disease_Guide_2011.pdf

Hunt J. et Poole N. 2010. Simulating leaf area duration to predict yield response to foliar fungicide in wheat and barley. Food security from sustainable agriculture. Proceedings of 15th Agronomy Conference, Lincoln, New Zealand, 2010 Nov.

Hysing S.C., Rosenqvist H. et Wiik L. 2012. Agronomic and economic effects of host resistance vs.fungicide control of barley powdery mildew in southern Sweden. *Crop Prot.* 41:122-127.

Jones D.R. 1995. Timing of fungicide application for control of eyespot disease of winter wheat. *Crop Prot.* 14(3):247-256.

Jordan V.W.L et Stingham G.R. 1988. Cost benefits of integrating nitrogen, plant growth regulators and fungicides in winter barley. *Crop Prot.* 7(4):252-257.

Jørgensen L.N., Nielsen G.C., Ørum J.E., Jensen J.E. et Pinnschmidt H.O. 2008. Integrating disease control in winter wheat - Optimizing fungicide input. *Outlooks Pest. Manage.* 19 (5):206- 213.

Karamanos R. E., Flore N.A., Harapiak J.T. et Stevenson F.C. 2012. The effect of non-targeted application of propiconazole on the yield and quality of malt barley. *Can. J. Plant Sci.* 92(2):341-349.

Kelley K.W. 2001. Planting Date and Foliar Fungicide Effects on Yield Components and Grain Traits of Winter Wheat. *Agron. J.* 93(2):380-389.

Kutcher H.R., Johnston A.M., Bailey K. L. et Malhi S.S. 2011. Managing crop losses from plant diseases with foliar fungicides, rotation and tillage on a Black Chernozem in Saskatchewan, Canada. *Field Crops Res.* 124(2):205-212.

Lipps P.E. 1996a. Leaf Rust of Wheat. Agronomic Crop Disease Fact Sheet. Ohio State University Extension, 2 p.

Lipps P.E. 1996b. Powdery Mildew of Wheat. Agronomic Crop Disease Fact Sheet. Ohio State University Extension, 2 p.

Lipps P.E et Mills D. 2002. *Septoria tritici* Blotch and *Stagonospora nodorum* Blotch. Agronomic Crop Disease Fact Sheet. Ohio State University Extension, 3 p.

Marinaccio F., Reyneri A. et Blandino M. 2015. Enhancing grain yield and quality of winter barley through agronomic strategies to prolong canopy greenness. *Field Crops Res.* 170:109-118.

Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO). 2009. Maladies des grandes cultures : Maladies des céréales. pp. 243-252

Olesen J.E., Mortensen J.V., Jørgensen L.N. et Andersen M.N. 2000. Irrigation strategy, nitrogen application and fungicide control in winter wheat on a sandy soil. I. Yield, yield components and nitrogen uptake. *The Journal of Agricultural Science* 134(01):1-11.

Pepler S., Gooding M.J., Ford K.E. et Ellis R.H. 2005. A temporal limit to the association between flag leaf life extension by fungicides and wheat yields. *Eur. J. Agron.* 22(4):363-373.

Poole N. 2009. Disease management and crop canopies – what are the interactions? A cereal cropmanagement guide, Grains Research Development Corporation. (GRDC Publication), Barton (ACT), p. Disponible à l'adresse: <http://catalogue.nla.gov.au/Record/4734315>

Poole N.F. et Arnaud M.E. 2014. The role of fungicides for effective disease management in cereal crops. *Can. J. Plant Pathol.* 36(1):1-11.

Ransom J.K. et McMullen M.V. 2008. Yield and disease control on hard winter wheat cultivars with foliar fungicides. *Agron. J.* 100(4):1130-1137.

Reynolds M., Bonnett D., Chapman S.C. 2011. Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies. *Journal of Experimental Botany* 62(2):439-452.

Rioux, S. 2015. Observations des maladies des céréales au Québec en 2014. *Can. Plant Dis. Survey* 95 : 89-90.

Rioux, S., D. Pageau, A. Vanasse, Y. Dion et B. Blackwell. 2013. Évaluation de fongicides dans les cultures de céréale à paille en stations expérimentales. Rapport déposé au Programme Prime-Vert, sous-volet 11.1 – Appui à la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture, MAPAQ, mars 2013. Disponible à l'adresse : http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Recherche_Innovation/Grandescultures/1531.pdf

Ruske R.E., Gooding M.J. et Jones S.A. 2003. The effects of adding picoxystrobin, azoxystrobin and nitrogen to a triazole programme on disease control, flag leaf senescence, yield and grain quality of winter wheat. *Crop Prot.* 22(7):975-987.

SAGe pesticides. 2015. Effets toxiques des matières actives. Disponible à l'adresse <http://www.sagepesticides.gc.ca/Recherche/RechercheMatieres.aspx> Consulté le 3 mars 2015

Spiertz J. 1977. The influence of temperature and light intensity on grain growth in relation to the carbohydrate and nitrogen economy of the wheat plant. *Eur. J. Agron.* 25:182-197.

Thompson N.M., Epplin F.M., Edwards J.T. et Hunger R.M. 2014. Economics of foliar fungicides for hard red winter wheat in the USA southern Great Plains. *Crop Prot.* 59:1-6.

Viljanen-Rollinson S.L.H, Marroni M.V. et Butler R.C. 2010. Benefits from plant resistance in reducing reliance on fungicides in cereal disease management. *New Zealand Plant Protection* 63:145-150.

Wegulo S.N., Zwingman M.V., Breathnach J.A. et Baenziger P.S. 2011. Economic returns from fungicide application to control foliar fungal diseases in winter wheat. *Crop Prot.* 30(6):685-692.

Weisz R., Cowger C., Ambrose G. et Gardner A. 2011. Multiple mid-atlantic field experiments show no economic benefit to fungicide application when fungal disease is absent in winter wheat. *Phytopathology* 101(3):323-333.

Wiik L. et Rosenqvist H. 2010. The economics of fungicide use in winter wheat in southern Sweden. *Crop Prot.* 29(1):11-19.

Wise K.A. 2014. Fungicide Efficacy for Control of Wheat Diseases. Purdue Extension. 2 p. Disponible à l'adresse : <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/BP/BP-162-W.pdf>

CHAPITRE 3

Utilisation des fongicides foliaires dans le maïs

Efficacité des fongicides foliaires

L'application de fongicides foliaires chez le maïs présente des effets extrêmement variables (MAAARO 2009a). Des effets positifs sur le rendement peuvent être observés, mais ces effets peuvent être très variables ou très faibles (Smith 2015). Les gains de rendements peuvent être minimes ou négligeables par rapport au témoin (parcelle non traitée). En Iowa, l'effet de plusieurs traitements fongicides et de différentes dates ou différents moments d'application ont été évalués lors d'une année de faible pression de maladies (2012). Bien que les parcelles traitées aux fongicides aient eu un rendement supérieur aux parcelles non traitées avec un gain moyen de 358 kg/ha, cette différence de rendement n'était pas significative d'un point de vue statistique (Robertson et Shriver 2012). De tels résultats ont aussi été observés au Mississippi où aucune différence significative n'a été observée entre les différents traitements fongicides (strobilurine, strobilurine + triazole, strobilurine + carboximide, triazole) (voir Tableau 2) et entre les parcelles traitées et non traitées (Allen 2013b). Cette absence d'effet sur le rendement a aussi été observée dans d'autres études (Grau et al. 2008; Robertson 2009), bien que l'intensité des maladies soit parfois réduite à la suite de l'application de fongicides (Robertson 2009).

Les effets des fongicides foliaires sur les rendements sont très variables et peuvent aussi varier d'un champ à l'autre (MAAARO 2009). Dans une autre étude effectuée de 2004 à 2007 au Wisconsin, des gains de rendements ont été observés après l'application de fongicides, mais seulement dans deux des onze essais réalisés (Lauer 2007). Malgré ces différences, certains auteurs rapportent que les gains de rendements seraient plus grands ou plus constants lorsque la pression des maladies est plus élevée (Paul 2014; Robertson et al. 2007; Wise et Mueller 2011) et lorsque les applications sont effectuées sur des hybrides sensibles aux maladies foliaires (Paul 2014). En Ohio, une étude effectuée sur une période de huit ans a démontré que l'utilisation de fongicides foliaires pour lutter contre les maladies fongiques du maïs, telles les maladies des taches brunes ou de l'helminthosporiose du Nord du maïs, permettait d'obtenir des gains de rendement dans 52 à 72 % des cas, avec un gain moyen de 226 à 389 kg/ha (Paul 2014). Le gain de rendement moyen variait de 63 à 314 kg/ha lors de faibles infestations (< 5 % de surface foliaire infectée) et de 439 à 628 kg/ha lors d'infestations plus sévères (> 5 % de surface foliaire infectée) (Paul 2014). Dans une étude effectuée au Québec, l'application d'un fongicide foliaire de la famille des pyraclostrobines (HEADLINE) a également permis une augmentation moyenne de rendement de 372 kg/ha, mais le comportement des hybrides était toutefois variable face à l'utilisation du fongicide (Rioux et al. 2011). En effet, les hybrides les plus performants ont produit des rendements équivalents, et ce, qu'il y ait eu application de fongicides ou non. Dans une autre étude réalisée au Québec, on rapporte un effet significatif des fongicides foliaires sur le rendement dans un cas sur trois (deux des six essais), avec des gains de rendements de 558 et de 591 kg/ha (Tremblay et Rioux 2012). Dans une étude récente effectuée aux États-Unis dans des conditions de faibles intensités de maladies fongiques (Mallowa et al. 2015), l'application d'une pyraclostrobine (HEADLINE) a permis des gains de

rendements quelle que soit la date d'application dans moins de la moitié des cas (3 sites-années sur 8). Les gains ont varié de 5 à 6 % selon les états soient de 487 à 557 kg/ha. Selon ces observations, l'application de fongicides foliaires lors de faibles infestations fongiques ne permettrait pas d'obtenir de meilleurs rendements dans plus de la moitié des cas.

Certains fongicides pourraient avoir des effets physiologiques positifs sur les plants de maïs, soit un effet de verdissement (Paul 2014 ; Wise et Mueller 2011) ou soit permettre une réduction de la verse (Grau et al. 2008). Toutefois, dans une autre étude, l'application de fongicides n'a eu aucun effet sur le nombre de plants versés (Allen 2013a). De plus, la plupart des études rapportant un effet physiologique des fongicides ont été réalisées en serre, alors que les conditions au champ sont très variables et que le rendement est influencé par de nombreux autres facteurs tels que le choix de l'hybride, les conditions météorologiques, ou encore la fertilisation (Paul 2014). Un fongicide foliaire pourrait réduire la verse, faciliter la récolte et ainsi avoir une incidence positive sur le rendement (Wise et Mueller 2011). Toutefois, selon ces auteurs, cet effet est variable. Dans certains cas, l'effet de verdissement peut retarder la sénescence des plants, ce qui peut poser des problèmes de logistique pour la récolte dans certains cas (Wise et Mueller 2011). Malgré ces effets physiologiques rapportés par certaines études, les essais effectués au Québec n'ont pas permis de montrer de telles tendances. En effet, l'application de fongicides foliaires a eu peu d'impact sur la verse, la teneur en eau et le poids spécifique des grains, ou encore l'intensité des symptômes à la surface des feuilles (Tremblay et Rioux 2012).

Dans le cas où la maladie est présente, il est important de considérer, outre le rendement potentiel, les conditions météorologiques et le prix du grain, le stade de développement du maïs et le pourcentage de plants infestés (Lipps et al. 2004). La prise de décision devrait aussi tenir compte de la résistance et de la sensibilité des hybrides, de la quantité des résidus de cultures, du précédent cultural, de la date de semis, du rendement potentiel, de la pression des maladies au stade d'apparition des panicules (stade VT, voir Tableau 3) ou de la sortie des soies (stade R1), des conditions climatiques au moment où la maladie est présente, des prévisions météorologiques pendant les stades reproductifs (remplissage des grains), des coûts d'achat et d'application des fongicides ainsi que de la valeur des grains sur le marché (Lauer 2007; Esker et al. 2008; Smith 2015). Le dépistage préventif au champ réalisé de 2 à 3 semaines avant l'atteinte du stade R1 pourrait s'avérer très important puisqu'il pourrait permettre d'aider à la décision de traiter ou non. Par exemple, l'application de fongicides peut être justifiée si le champ est semé avec un hybride très sensible et que les feuilles inférieures sont atteintes (Lipps et al. 2004). En particulier, dans le cas de la maladie des taches grises et du dessèchement, un traitement fongique est préconisé si la moitié des feuilles sous l'épi sont atteintes (Lipps et al. 2004).

En Ohio et au Wisconsin, par exemple, des critères précis ont été établis pour éclairer les producteurs (Lauer 2007; Paul 2014). Ainsi, pour des hybrides classés sensibles, un traitement est préconisé si, pour 50 % des plants, la troisième feuille sous l'épi est atteinte au moment de la floraison mâle (VT). Pour des hybrides classés intermédiaires, plusieurs conditions doivent être retrouvées pour que le traitement soit recommandé : champ possédant des antécédents de maladies fongiques, précédent cultural de maïs avec plus de 35 % de résidus couvrant le sol et temps doux et humide prévu durant l'été. En revanche, pour des hybrides classés résistants, un traitement fongicide n'est pas recommandé, quelles que soient les conditions (Lauer 2007; Paul 2014).

Moments d'application

Selon les résultats d'Allen (2013a), il n'y aurait aucune différence significative dans les rendements obtenus à la suite de l'application des fongicides foliaires chez le maïs au stade V6 (6^e feuille) ou R1. Toutefois, une majorité d'études s'entendent pour dire que la meilleure période d'application des fongicides foliaires dans le maïs se situerait autour des stades VT (sortie de la panicule) et R1 (apparition des soies) voire R2 (gonflement). En effet, même si une application plus hâtive, par exemple au stade V4-V8, peut permettre d'appliquer le fongicide en même temps que l'herbicide, une application plus tardive au stade VT-R1 (Hershman et al. 2011) ou VT-R2 (Smith 2015) s'avère plus efficace en assurant des rendements plus élevés (Smith 2015). Les résultats de Robertson et Shriver (2012) vont aussi dans ce sens puisque des gains de rendement supérieurs ont été observés à la suite de l'application de fongicides au stade R1 ou R2 avec respectivement des gains moyens de 345 et 389 kg/ha comparativement au stade V6 (308 kg/ha).

Moins de maladies ont été observées avec une application au stade VT plutôt que lors d'une application plus tardive, soit au stade R2 ou R3 (Robertson 2009). Cette observation est aussi partagée par Mallowa et al. (2015) lors d'une application de fongicides (pyraclostrobine) au stade VT/R1 qui a permis une réduction des maladies fongiques comparativement à une application effectuée au stade R2/R3. Dans cette étude, l'application de fongicides au stade VT/R1 a réduit la sévérité des infestations de 20 à 32 %, et cela dans 5 des 8 sites-années étudiés. Selon Lipps et al. (2004), il est important que le traitement soit effectué avant que la feuille de l'épi soit atteinte. En particulier, une meilleure réponse en termes de rendement est observée à la suite de l'application de fongicide sur les plants malades avant le stade R1, ce qui fait en sorte que les plants soient protégés durant les 4 premières semaines de remplissage des grains (Lipps et al. 2004).

À propos du fractionnement des applications de fongicides foliaires (Robertson et Shriver 2012 : V5 puis R1; Allen 2013 a : V6 puis R1; Smith 2015 : V4-V6 puis VT-R2), il a été montré que cela n'apportait pas de meilleurs résultats, mais offrait des résultats comparables à un traitement standard soit une application effectuée entre les stades VT et R2. Même si les traitements fongiques effectués aux stades VT-R1 sont plus efficaces et peuvent faire augmenter les rendements, il faut toutefois garder à l'esprit qu'un gain de rendement ne signifie pas automatiquement un gain économique. Ainsi, les résultats de 613 essais ont montré qu'une application de fongicides effectuée entre les stades V15 (15^e feuille) et R2 permettait des gains de rendements de 377 kg/ha, mais n'était rentable que dans 45 % des cas (Wise et Mueller 2011).

Rentabilité économique

Même si plusieurs études rapportent des gains de rendement significatifs à la suite de l'application de fongicides foliaires, le fait qu'il y ait un gain de rendement n'implique pas nécessairement que les traitements soient économiquement rentables. Plusieurs études ont établi des seuils de rentabilité pour les traitements fongicides dans le maïs. Par exemple, en Ohio, les traitements fongicides étaient rentables si le gain de rendement qui en découlait était d'au moins 3 à 4 boisseaux/acre (bo/A) soit de 188 à 251 kg/ha (Paul 2014), alors que d'autres études identifiaient des seuils de rentabilité de 6 bo/A, soit 377 kg/ha (Esiker et al. 2008; Wise et Mueller 2011).

Les résultats de plusieurs essais américains montrent que les traitements de fongicides foliaires dans le maïs sont économiquement rentables dans approximativement la moitié des cas (Wise et Mueller 2011; Robertson et Shriver 2012; Paul 2014). En effet, la compilation de résultats de recherche sur une période de 10 ans impliquant 472 essais, a permis de

montrer un gain de rendement dans 80 % des cas, mais qu'un bénéfice économique n'était observé que dans 48 % des cas (Wise et Mueller 2011). Dans une autre étude effectuée en Iowa, un gain de rendement à la suite de l'application de fongicides a été observé dans 77 % des cas, mais un bénéfice économique a été rapporté dans seulement 27 % des cas (Robertson et al. 2007). Au Québec, des résultats rapportent que l'application de fongicides foliaires dans le maïs a été rentable dans 30 à 52 % des cas, selon le coût du traitement à l'hectare (Rioux et al. 2011).

Selon les données scientifiques disponibles, l'utilisation de fongicides foliaires aurait permis d'augmenter significativement les rendements du maïs-grain dans 50 à 80 % des essais réalisés. Toutefois, leur utilisation ne serait économiquement rentable que dans 30 à 50 % des cas. Ces gains de rendement et de bénéfices économiques associés dépendent grandement de l'intensité des maladies. Ainsi, à la suite d'un traitement préventif en l'absence de maladie ou lors d'une année de faible pression de maladies, les gains de rendement observés se sont avérés rentables dans respectivement 45 % (Paul 2014) et 54 % des cas (Robertson et Shriver 2012). L'utilisation de fongicides foliaires dans le maïs permettrait d'augmenter les rendements et serait rentable si les conditions climatiques sont propices au développement de maladies fongiques et que les maladies sont bel et bien présentes au champ (Wallheimer 2011).

Afin d'évaluer la rentabilité économique des fongicides foliaires, Belzile (2016) a utilisé la méthode de la budgétisation partielle (BP) sur un ensemble de 45 essais agronomiques portant sur le maïs et le soya et provenant des travaux menés au Centre de recherche sur les grains (CÉROM) entre 2007 et 2014. La BP consiste à mesurer la rentabilité d'un changement de pratique agricole qui n'affecte pas la structure de l'entreprise (Castle et al. 1987). À la lumière des résultats obtenus dans son analyse, Belzile (2016) conclut que les perspectives de rentabilité de l'utilisation des fongicides foliaires en grandes cultures sont très faibles. Sur la base des résultats agronomiques des essais réalisés dans la culture du maïs-grain, l'analyse économique effectuée par Belzile (2016), montre qu'une faible proportion des traitements a mené à un solde positif (3 sur 10). Aussi, les seuils de rentabilité, en termes de rendement à obtenir pour rentabiliser les traitements, sont significativement plus élevés que les gains de rendement réellement obtenus. En moyenne, dans le maïs-grain, le gain de rendement nécessaire était de 2.7 %. Or, les traitements fongicides foliaires dans cette culture n'ont permis que des gains de rendement de 1.4 %. En général, cela veut donc dire que les traitements fongicides devraient procurer le double du gain de rendement réellement obtenu afin de les rentabiliser dans le maïs-grain (Belzile 2016).

Solutions alternatives aux fongicides foliaires

L'utilisation d'hybrides résistants aux maladies fongiques constitue une solution alternative à l'application des fongicides foliaires. Les données sur les degrés de tolérance ou de résistance des hybrides face à différentes maladies fongiques sont généralement disponibles auprès des compagnies semencières.

En Ohio, plusieurs pratiques agricoles sont recommandées pour lutter contre les maladies fongiques, sans avoir recours à des fongicides foliaires (Lipps et al. 2004). Ces méthodes de lutte passent tout d'abord par l'utilisation de semences de qualité et par le choix d'hybrides à haut rendement et résistants aux maladies. De nombreux hybrides de maïs disponibles sur le marché ont une résistance acceptable aux maladies foliaires (Lauer 2007). De ce fait, dans la plupart des champs, le choix d'hybrides classés de modérément à fortement résistants peut permettre de contrer les dommages et les pertes reliés aux maladies fongiques, sans avoir recours à l'application de fongicides (Hershman et al. 2011). Des

résultats d'essais réalisés au Québec n'ont cependant pas permis de montrer une interaction significative entre les traitements fongiques et les différents hybrides utilisés (Tremblay et Rioux 2012). La faible pression des maladies généralement observée au Québec sur le maïs pourrait expliquer partiellement ce constat.

Au champ, il est également important de semer selon les taux recommandés afin d'éviter de stresser les plants à des taux de semis trop élevés (Lipps et al. 2004). Les champs doivent être bien drainés pour éviter les surplus d'eau et la fertilisation doit être équilibrée en évitant les excès d'azote qui peuvent favoriser la pourriture de la tige et certaines maladies foliaires (Lipps et al. 2004). Les infestations peuvent aussi être limitées en réalisant des rotations de cultures, en effectuant un travail du sol avec enfouissement des résidus et en maîtrisant les populations d'insectes (Lipps et al. 2004). Dans le cas de systèmes avec un travail du sol réduit, des hybrides résistants devraient être utilisés et la durée de la rotation devrait être augmentée.

Lorsque l'on observe de la pourriture sur les tiges, une évaluation de la quantité de tiges pourries devrait être effectuée de 10 à 14 jours avant la récolte afin que les champs ayant une plus grande proportion de pourriture sur tige soient récoltés en premier pour éviter les pertes dues à la verse (Lipps et al. 2004). Dans ces champs ainsi que dans les champs présentant une grande quantité de plants versés, il est conseillé d'ajuster correctement la machinerie pour réduire les pertes. Enfin, après la récolte, le développement de maladies peut être réduit en asséchant correctement les grains et en maintenant de bonnes conditions d'entreposage (Lipps et al. 2004).

Maladies fongiques retrouvées au Québec

Pour de plus amples informations sur les maladies fongiques retrouvées au Québec, il est recommandé au lecteur de consulter le document « Maladies des grandes cultures au Canada » (Bailey et al. 2004).

Le tableau 4 présente la synthèse des effets de différentes méthodes de lutte contre les maladies fongiques du maïs.

Anthracnose (*Colletotrichum graminicola*)

L'anthracnose est caractérisée par deux types de symptômes, soient les phases brûlure des feuilles et pourriture de la tige (Bailey et al. 2004). Des hybrides de maïs résistants sont disponibles et offrent un bon moyen de lutte. Cependant, la résistance à la phase brûlure des feuilles n'implique pas nécessairement la résistance à la pourriture de la tige, et vice-versa (Lipps et Mills 2001 a).

Le mycélium survit à l'hiver dans les grains et les résidus de maïs. La rotation des cultures ainsi que le travail du sol avec enfouissement des résidus de culture sont de bonnes méthodes de lutte (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; Lipps et Mills 2001 a; MAAARO 2009b). Même si plusieurs fongicides ont montré une très bonne efficacité contre l'anthracnose (azoxystrobine, pyraclostrobine, picoxystrobine, azoxystrobine + propiconazole ou trifloxystrobine + prothioconazole), les traitements de fongiques foliaires ne semblent pas rentables en Amérique du Nord (Wise 2014).

Dessèchement (*Exserohilum turcicum*, forme sexuée : *Setosphaeria turcica*)

Il s'agit d'une des maladies les plus dommageables au Canada, pouvant occasionner de fortes pertes de rendement (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006). Des pertes de rendement de 30 à 50 % sont rapportées si l'infestation atteint les feuilles supérieures avant

le stade R1 (Lipps et Mills 2001d). Cependant, les pertes sont rares lors de saisons sèches, et minimales lorsque l'infection est limitée ou retardée jusqu'à 6 semaines après le stade R1 (Lipps et Mills 2001d). Les risques d'infection augmentent avec : l'utilisation d'hybrides sensibles, la monoculture de maïs, le semis direct, le semis tardif, l'augmentation du peuplement, un potentiel de rendement élevé, l'irrigation, la présence de maladies lors de la sortie de la panicule, des conditions climatiques favorables au développement de maladies (températures de 18-27 °C et mouillure des feuilles; Lipps et Mills 2001d), l'historique de maladies du champ et la verse (Hershman et al. 2011).

Le champignon survit à l'hiver sous forme de spores et de mycélium dans les résidus de maïs. La rotation des cultures, le travail du sol réduisant la quantité de résidus de cultures à la surface du sol sont de bonnes méthodes de lutte (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006 ; Lipps et al. 2004 ; MAAARO 2009b). Il existe quatre races connues de champignons ainsi que des hybrides de maïs résistants à ces quatre races ou à une race en particulier (hybride spécifique). L'utilisation de ces hybrides résistants peut aider à contrer cette maladie sans avoir recours à des traitements fongicides (Hershman et al. 2011; Lipps et Mills 2001d).

Plusieurs fongicides foliaires s'avèrent très efficaces pour lutter contre le dessèchement (à base de pyraclostrobine, picoxystrobine, prothioconazole, tébuconazole, azoxystrobine + propiconazole, pyraclostrobine + metconazole ou trifloxystrobine + prothioconazole; Wise 2014). En Italie, des chercheurs ont montré qu'un traitement d'azoxystrobine et de propiconazole, effectué entre le milieu du stade élongation de la tige et la floraison (apparition des soies), pouvait réduire l'incidence de la maladie et apporter un gain de rendement de l'ordre de 700-900 kg/ha (Blandino et al. 2012). En Amérique du Nord, la rentabilité des traitements de fongicides foliaires semble moins évidente. Tout d'abord, en Ohio, les traitements fongicides sont recommandés uniquement pour le maïs de semence ou le maïs sucré, lorsque la moitié des feuilles sous l'épi est atteinte (Lipps et Mills 2001d). Les fongicides sont rarement utilisés pour lutter contre le dessèchement, car les coûts du traitement et de l'application sont généralement supérieurs au bénéfice apporté par le gain de rendement (Lipps et al. 2004). Au Canada, un traitement au propiconazole peut nécessiter plusieurs applications afin d'être efficace, ce qui n'est pas économiquement rentable (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006). Pour une meilleure rentabilité, l'application de fongicides doit se faire lorsque plusieurs facteurs de risques sont présents au moment de la sortie de la panicule (Hershman et al. 2011).

[Dessèchement \(*Setosphaeria turcica* = forme asexuée de *Exserohilum turcicum*\)](#)

La maladie a généralement peu d'incidence, car l'utilisation d'hybrides de maïs présentant de la résistance réduit les pertes de rendements. Cependant, on observe une avancée de la maladie depuis quelques années, possiblement due à une perte de tolérance (MAAARO 2009b).

[Kabatiellose \(*Aureobasidium zeae*\)](#)

Le champignon survit à l'hiver dans les résidus de maïs et les semences (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b). Il s'agit d'une maladie peu importante au Canada causant peu de dommages, sauf en monoculture de maïs et dans les champs en semis direct ou en travail réduit du sol (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; Lipps et al. 2004; Lipps et Mills 2001b; MAAARO 2009b). En Ohio, des pertes de rendement ont été observées à la suite d'infections hâtives (avant le stade R1) dans des champs en semis direct ou en travail réduit et ensemencés avec un hybride sensible (Lipps et Mills 2001b).

Des pertes de rendement peuvent être aussi prévisibles si les feuilles sont largement atteintes dans les 3-4 semaines suivant le stade R1 (Lipps and Mills 2001b).

Les méthodes de lutte passent par un travail du sol, l'enfouissement des résidus et la rotation des cultures (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; Lipps et al. 2004; Lipps et Mills 2001b; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b). Lorsqu'un travail de sol a lieu, le fait de ne pas cultiver du maïs pendant une année permet de réduire considérablement la quantité d'inoculum dans le sol, alors que la durée doit être allongée pour les systèmes en semis direct ou en travail réduit (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006). Un autre moyen de lutte repose sur l'utilisation d'hybrides résistants puisque la plupart des hybrides commerciaux ont un certain degré de résistance à la kabatiellose (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006).

Plusieurs fongicides foliaires présentent une excellente efficacité contre la kabatiellose (par exemple, ceux à base de pyraclostrobine, de propiconazole, de prothioconazole, d'azoxystrobine + propiconazole, de pyraclostrobine + metconazole ou de trifloxystrobine + propiconazole, Wise 2014) ou une efficacité très bonne à excellente (azoxystrobine + propiconazole, Wise 2014). De tels traitements peuvent avoir un effet significatif sur la maladie lorsqu'ils sont réalisés tôt en saison. Cependant, il apparaît que l'utilisation de fongicides foliaires pour lutter contre la kabatiellose n'est pas économiquement rentable (Lipps et Mills 2001b), c'est pourquoi elle est peu recommandée au Canada (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006).

Taches grises (*Cercospora zeae-maydis*)

Le champignon survit à l'hiver sous forme de mycélium dans les résidus des cultures et autres débris végétaux (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b). La maladie des taches grises est peu commune au Canada (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006). Cependant, il s'agit d'une maladie qui a des incidences économiques importantes et qui prend de l'ampleur depuis quelques années dans les régions proches des Grands Lacs (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b).

Les moyens de lutte passent par la rotation des cultures, le travail du sol, l'enfouissement des résidus de cultures et par la bonne gestion des mauvaises herbes (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; Lipps et Mills 2001c; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b). Le fait de ne pas cultiver de maïs pendant une année est une méthode efficace pour réduire l'incidence de la maladie puisque le champignon ne survit pas plus d'une année dans les résidus de maïs (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006). En revanche, dans les systèmes où le travail du sol est réduit, le nombre d'années sans maïs doit passer à deux ans pour avoir une incidence positive (Lipps et Mills 2001c). Les moyens de lutte passent également par l'utilisation d'hybrides résistants (Lipps et Mills 2001c; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b). En particulier, le choix d'hybrides modérément à fortement résistants peut contrer les dommages et éviter l'utilisation de fongicides foliaires (Hershman et al. 2011).

En général, l'application de fongicides foliaires n'est pas nécessaire et donc non recommandée (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b), sauf dans les cas où un hybride sensible est semé et s'il existe un historique de la maladie dans le champ (Lipps et Mills 2001c) ou si la maladie apparaît tôt en saison (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b). Plusieurs fongicides présentent une excellente efficacité (azoxystrobine,

pyraclostrobine, tétraconazole, azoxystrobine + propiconazole, pyraclostrobine + metconazole ou trifloxystrobine + prothioconazole, Wise 2014) ou une très bonne efficacité (pyraclostrobine + fluxapyroxad ou trifloxystrobine + propiconazole, Wise 2014) contre la maladie des taches grises. Aux États-Unis, il a été montré qu'un traitement fongicide à base de strobilurine (azoxystrobine ou pyraclostrobine) pouvait augmenter les rendements, mais l'augmentation était plus importante pour des hybrides sensibles (en moyenne 1,6 t/ha), que pour des hybrides modérément sensibles (1,15 t/ha) ou tolérants (0,79 t/ha) (Newman 2008). Un traitement au propiconazole a aussi été efficace pour réduire la gravité de la maladie et augmenter significativement les rendements (Munkvold et al. 2001). Cependant, les chances pour qu'un traitement au propiconazole se traduise par un bénéfice économique sont en moyenne de 33 % et les résultats dépendent grandement des hybrides utilisés (Munkvold et al. 2001). Finalement, selon Hershman et al. (2011), un traitement fongique a plus de chance d'être rentable si plusieurs facteurs de risques sont présents au stade VT (sortie de la panicule), d'où l'importance du dépistage, de l'évaluation de risques et du coût/bénéfice dans chaque champ.

Rouille commune (*Puccinia sorghi*)

Le champignon responsable de la rouille commune n'hiverne pas au Canada, mais provient des États-Unis ou du Mexique (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b). De ce fait, la rotation des cultures, le travail du sol et l'enfouissement des résidus n'ont pas d'incidence sur la maladie.

Dans l'ensemble, la rouille commune a une incidence économique négligeable (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b) et les dommages sont variables d'une année à l'autre (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006). Des pertes de rendement peuvent subvenir (surtout pour le maïs sucré) au cours de certaines années exceptionnelles où l'été est frais, lors de semis tardifs ou lorsque les feuilles sous l'épi sont sévèrement atteintes (Lipps et al. 2001). En Ontario, on rapporte que la maladie est fréquemment observée, mais qu'elle nécessite rarement d'être réprimée (Lipps et al. 2001). Les moyens de lutte incluent un semis hâtif (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006), le choix d'hybrides résistants (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; Lipps et al. 2004; Lipps et al. 2001; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b) ou encore l'application de fongicides foliaires (Lipps et al. 2004). Les hybrides commerciaux ont généralement une bonne tolérance à la maladie (sauf la majorité des lignées de maïs sucré et de semences) (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b).

En grandes cultures, l'application de fongicides foliaires pour lutter contre la rouille commune n'est souvent pas nécessaire (Hershman et al. 2011; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b) et peu rentable (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006 : traitement au propiconazole), sauf dans le cas d'hybrides sensibles ou de maïs de semence (ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b). Toutefois, selon Lipps et al. (2001), un traitement fongique foliaire peut être recommandé si des infestations importantes au niveau des feuilles inférieures sont observées avant le stade R1 (apparition des soies) et si les prévisions météorologiques annoncent des températures fraîches et humides. Dans ce cas, plusieurs fongicides montrent une excellente efficacité (azoxystrobine, pyraclostrobine, pyraclostrobine + metconazole ou trifloxystrobine + prothioconazole, Wise 2014) ou une efficacité allant de très bonne à excellente (picoxystrobine ou azoxystrobine + propiconazole, Wise 2014) contre la rouille commune.

Charbon commun (*Ustilago zaeae*)

Le champignon survit à l'hiver dans le sol, les résidus des cultures et les semences pendant plusieurs années. Les rotations ne constituent donc pas une méthode efficace pour lutter contre cette maladie (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b).

Dans les cas les plus sévères, plus de 25 % des plants peuvent être touchés. Même si tous les hybrides sont quelque peu sensibles au charbon commun, la plupart des hybrides commerciaux peuvent résister à de fortes épidémies (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009 b).

Les meilleurs moyens de lutte sont de limiter les dommages (mécaniques ou causés par les herbicides) aux plants et d'effectuer une gestion équilibrée de la fertilisation (éviter l'excès d'azote). En revanche, les fongicides foliaires sont inefficaces pour lutter contre le charbon commun (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; MAAARO 2009b).

Tableau 2 : Informations sur certains fongicides foliaires disponibles

Produit commercial	Compagnie	Matière active (groupe)	Moment d'application & dose	Quantité maximale annuelle	Indice de risque environnemental (IRE)	Indice de risque pour la santé (IRS)
ACAPELA	® DUPONT	picoxystrobine (11)	V4-V7 : 0,21-0,28 l/ha	2 applications	4	28
			VT-R2 : 0,42-0,84 l/ha		42	33
PROLINE 480	® BAYER	prothioconazole (3)	V4-V8, VT : 0,4 l/ha	1,6 l/ha	3	50
QUADRIS	® SYNGENTA	azoxystrobine (11)	V4-V8 : 0,42-0,63 l/ha	8,6 l/ha	52	15
			VT : 0,42-1,09 l/ha		55	17
QUILT	® SYNGENTA	azoxystrobine (11) +	V4-V8 : 0,49-0,98 l/ha	3,92 l/ha	45	407
		propiconazole (3)	VT : 0,73-0,98 l/ha			
PRIAXOR	® BASF	pyraclostrobine (11) +	V4-V8, VT : 0,3 l/ha	0,3 l/ha	165	163
		fluxapyroxad (7)				
HEADLINE	® BASF	pyraclostrobine (11)	VT : 0,4-0,6 l/ha	2 applications	74	66

Tableau 3 : Stades phénologiques du maïs

VE	Émergence
V1... V14	Nombre de feuilles présentes avec une ligule visible.
VT1	Panicule présente dans le verticille, mais non encore visible.
VT2	Panicule pointe à l'extérieur du verticille.
VT3	Panicule complètement émergée.
VT4	Panicule complètement émergée et branches déployées.
R1	Soies-Apparition des premières soies à l'extrémité de l'épi.
R1.2	Début du relâchement du pollen par la panicule.
R1.3	Relâchement du pollen -Anthères observables sur la panicule.
R1.4	50 % des anthères desséchées et tournant au brun.
R2	Développement de grains blanchâtres sur l'épi. Les soies sont plutôt brunes et desséchées.
R3	Laiteux-Les grains sont généralement jaunes et contiennent un liquide laiteux.
R4	Pâteux-Le liquide dans les grains passe de laiteux à pâteux.
R5	Denté - Les grains sont généralement dentés à leur extrémité.
R6	Maturité- Accumulation maximale de matières sèche. Formation d'un point noir à la base des grains.

Tableau 4 : Effets de différentes méthodes de lutte contre les maladies fongiques du maïs

Méthode de lutte	Anthracnose	Dessèchement	Kabatiellose	Taches grises	Rouille	Charbon
Fongicides foliaires	±	±	±	±	±	0
Hybrides résistants	+	+	+	+	+	+
Rotation des cultures	+	+	+	+	0	0
Enfouissement des résidus	+	+	+	+	0	ND
Date de semis	ND	+	ND	ND	+	ND
Gestion des mauvaises herbes	ND	ND	ND	+	ND	ND
Limitation des dommages aux plants	ND	ND	ND	ND	ND	+
Fertilisation équilibrée	ND	ND	ND	ND	ND	+

+ : effet positif (méthode efficace contre la maladie), 0 : sans effet (non efficace), ± : effet mitigé ou effet positif, mais sans incidence économique notable, ND : non documenté.

Littérature citée

Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2006. Profil de la culture du maïs de grandes cultures au Canada. pp. 63

Allen T. 2013a. Are Early, Vegetative Fungicide Applications Beneficial for Enhanced Corn Production? (Part I: Yield). Mississippi Crop Situation 28 avril 2013. Mississippi State University - Extension service. Disponible à l'adresse : <http://www.mississippi-crops.com/2013/04/28/are-early-vegetative-fungicide-applications-beneficial-for-enhanced-corn-production-part-i/>

Allen T. 2013b. Automatic Tassel (VT) Fungicide Applications in Corn: Should You be Doing One? Mississippi Crop Situation 15 juin 2013. Mississippi State University - Extension service. Disponible à l'adresse : <http://www.mississippi-crops.com/2013/06/15/automatic-tassel-vt-fungicide-applications-in-corn-should-you-be-doing-one/>

Bailey K. L., Couture L, Gossen B.D., Gugel R.K., et Morrall R.A.A. 2004. Maladies des grandes cultures au Canada. 1^{re} édition. Société canadienne de phytopathologie. 332 pages.

Belzile L. 2016. Utilisation des fongicides foliaires en grandes cultures (volet économique). Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 19 p. Disponible à l'adresse : <http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/rapportfinalfongicidesfoliairesgrandescultures.pdf>

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

Castle E. N., Becker M.H., et Nelson A.G. 1987. *Farm Business Management – The Decision-Making Process*. Macmillan Publishing Company. 413 pages.

Esker P., Grau C., et Ballweg M. 2008. Foliar fungicide for corn. In: Proceedings of the Wisconsin Fertilizer, Aglime and Pest Management Conference Madison, Wisconsin (USA), 15-17 janvier 2008. p. 57-59

Grau C., Esker P., et Ballweg M. 2008. University of Wisconsin's corn foliar fungicide trials results. In: Proceedings of the Wisconsin Fertilizer, Aglime and Pest Management Conference Madison, Wisconsin (USA), 15-17 janvier 2008. p. 60-66

Hershman D.E., Vincelli P. et Kaiser C.A. 2011. Foliar Fungicide Use in Corn and Soybeans. Plant Pathology Fact Sheet, University of Kentucky, Plant Pathology Extension, p. Disponible à l'adresse : http://www2.ca.uky.edu/agcollege/plantpathology/ext_files/PPFShtml/PPFS-GEN-12.pdf

Lauer J. 2007. To spray or not to spray – Will foliar fungicide be routine in the new corn production economics? *Field Crops* 28:45-52.

Lipps P., Dorrance A. et Mills D. 2004. Corn disease management in Ohio. The Ohio State University Extension, pp. 20

Lipps P.E., Dorrance A.E. et Mills D.R. 2001. Common Corn Rust. Agronomic Crop Disease Fact Sheet. Ohio State University Extension, 2 p.

Lipps P.E. et Mills D.R. 2001a. Anthracnose Leaf Blight and Stalk Rot of Corn. Agronomic Crop Disease Fact Sheet. Ohio State University Extension, 2 p.

Lipps P.E. et Mills D.R. 2001b. Eyespot Disease of Corn. Agronomic Crop Disease Fact Sheet. Ohio State University Extension, 2 p.

Lipps P.E. et Mills D.R. 2001c. Gray Leaf Spot on Corn. Agronomic Crop Disease Fact Sheet. Ohio State University Extension, 2 p.

Lipps P.E. et Mills D.R. 2001d. Northern Corn Leaf Blight. Agronomic Crop Disease Fact Sheet. Ohio State University Extension, 2 p.

Mallowa S.O., Esker P.D., Paul P.A. et al. 2015. Effect of maize hybrid and foliar fungicides on yield under low foliar disease severity conditions. *Phytopathology*:PHYTO-08-14-0210-R.

Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO). 2009 a. Impact of Foliar Fungicides on Corn Hybrids. *Crop Advances : Field Crop Report 2009*, Ontario Soil and Crop Improvement Association, 4 p.

Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO). 2009b. *Maladies des grandes cultures : Maladies du maïs*. pp. 228-233

Munkvold G.P., Martinson C. A., Shriver J.M. et Dixon P.M. 2001. Probabilities for profitable fungicide use against gray leaf spot in hybrid maize. *Phytopathology* 91(5):477-484.

Newman M.A. 2008. Foliar Fungicides For Gray Leaf Spot (GLS) Control In Corn. In: *Proceedings of the Annual National Conservation Systems Cotton & Rice Conference*, Tunica, Mississippi (USA), 21-22 Janvier 2008. p. 46-47

Paul P. 2014. Foliar Fungicide Application in Field Corn - A 2014 Update. *C.O.R.N. Newsletter* 22, 14-22 juillet 2014. Ohio State University.

Rioux S., Tremblay G. et Lafontaine P. 2011. Évaluation de l'application de fongicide dans la culture de maïs-grain et de soya en parcelles expérimentales. Rapport final réalisé dans le cadre du programme Prime-Vert, sous-volet 11.1 – Appui à la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture et Agroalimentaire Canada. Québec, pp. 7

Robertson A., Abendroth L. et Elmore R. 2007. Yield responsiveness of corn to foliar fungicide application in Iowa. *Integrated crop management newsletter* 498(26). Iowa State University Extension, 281-285 p. Disponible à l'adresse : <http://www.ipm.iastate.edu/ipm/icm/2007/12-10/foliarfun.html>

Robertson A. et Shriver J. 2012. Effect of Foliar Fungicides on Corn Yields in Iowa in 2012. Iowa State University, Extension and Outreach, Disponible à l'adresse <http://www.extension.iastate.edu/CropNews/2013/0528robertsonshriver.htm>

Robertson A.E. 2009. Effectiveness of Foliar Fungicides by Timing on Hybrid Corn in Iowa. Iowa State University, 2 p.

Smith D. 2015. Utility of Fungicides in Corn & Soybeans. *Corn/Soy Expo*, Wisconsin Dells, Wisconsin (USA), 29-30 janvier 2015.

Tremblay G. et Rioux S. 2012. Devrait-on utiliser des fongicides dans le maïs-grain ? *Grandes Cultures*. Octobre 22 (4):37.

Wallheimer B. 2011. Fungicides may not increase corn yields unless disease develops. Purdue University Newsroom p. Disponible à l'adresse : <http://www.purdue.edu/newsroom/research/2011/110622WiseFungicides.html>

Wise K. et Mueller D. 2011. Are Fungicides No Longer Just For Fungi? An Analysis of Foliar Fungicide Use in Corn. The American Phytopathological Society, Disponible à l'adresse <http://www.apsnet.org/publications/apsnetfeatures/Pages/fungicide.aspx>

Wise K.A. 2014. Fungicide Efficacy for Control of Corn Diseases. Purdue Extension. 2 p. Disponible à l'adresse : <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/BP/BP-160-W.pdf>

CHAPITRE 4

Utilisation des fongicides foliaires dans le soya

Efficacité des fongicides foliaires

Plusieurs études ont démontré l'efficacité des fongicides foliaires pour lutter contre plusieurs maladies dans le soya. Par exemple, il a été mis en évidence que les fongicides étaient efficaces pour lutter contre la maladie des taches brunes ou l'antracnose (Potter 2005a; Potter 2005b) et pouvaient réduire l'intensité des taches foliaires au Québec (application de pyraclostrobine, Rioux et al. 2011). Cependant, l'efficacité des fongicides peut varier en fonction du type de produit utilisé et de la présence/absence de maladie. Ainsi, selon Giesler et Gustafson (2008), l'application de strobilurines serait plus efficace en traitement préventif (en absence de maladie) alors que l'application de triazoles serait plus efficace en traitement curatif dès les premières observations d'infestation.

Bien que les fongicides foliaires puissent être efficaces pour lutter contre des maladies, certaines études ont montré qu'une application de fongicides n'avait eu aucun effet sur le rendement (Potter 2005c; Smith 2015; Weidenbenner et al. 2014) que le traitement ait été réalisé en absence de maladies (traitement préventif) ou lorsque celles-ci sont peu présentes (Potter 2005 a, Potter 2005b; Swoboda et Pedersen 2009). Au Wisconsin, par exemple, l'application de fongicide foliaire n'est généralement pas justifiée, sauf s'il existe un risque élevé de développement de la pourriture à sclérotés. Dans le cas de la maladie des taches brunes et de la cercosporose, un traitement fongique n'est généralement pas justifié, mais pourrait devenir possiblement avantageux si des précipitations abondantes (65-90 mm) surviennent entre les stades R3 et R5 (Carmona et al. 2011). Au Québec, les résultats vont dans le même sens. Bien qu'une application de fongicides (pyraclostrobine) ait permis de réduire l'intensité des taches foliaires, cette application n'avait toutefois pas permis d'obtenir des gains de rendements ni d'améliorer la qualité des grains (Rioux et al. 2011). D'autres études rapportent des gains de rendement à la suite de l'application de fongicides foliaires, mais les résultats sont variables selon les années (gain de 19 à 163 kg/ha; Mueller 2014). Par exemple, un gain de rendement à la suite de l'application de fongicides foliaires a été observé aux États-Unis (Villamil et al. 2012), mais d'autres facteurs pouvaient avoir interféré pour expliquer les gains de rendement (ex. application d'insecticide, traitement de semences, travail du sol, composition du sol).

Dans la documentation scientifique, il y a une minorité d'études où les applications de fongicides foliaires se sont traduites par des gains de rendements. Ainsi, aux États-Unis, Hershman et al. (2011) rapportent un gain de rendement à la suite d'une application de pyraclostrobine dans seulement 20 % des cas. Des résultats similaires ont été observés en Ohio, puisque l'application de fongicides a eu un effet sur le rendement dans 20 à 30 % des cas, avec des résultats variables selon les années (Dorrance et al. 2010). Au Québec, des résultats d'essais ont montré qu'une seule application de picoxystrobine n'avait eu aucun effet sur le rendement, alors que deux applications avaient eu un effet positif (Faucher et Perreault 2013). Enfin, dans une étude effectuée au Missouri, l'application de strobilurines au

stade R4 a permis d'augmenter les rendements, mais uniquement sur un des deux sites à l'étude (gain de 230 à 360 kg/ha) et a eu des effets variables sur l'intensité de la maladie des taches brunes et de la cercosporose (Nelson et al. 2010). Dans cette étude, la fertilisation potassique jouait également un rôle significatif puisque l'application en présemis de chlorure de potassium (KCl) a permis de réduire la gravité de la maladie des taches brunes et de la cercosporose (jusqu'à 6 %) et a permis de faire augmenter les rendements sur un des deux sites expérimentaux (gain variant de 110 à 390 kg/ha).

Dans une étude effectuée en Inde, Joshi et al. (2014) ont montré que l'application de fongicides (pyraclostrobine) avait plusieurs effets positifs pour le soya en se traduisant par l'augmentation des éléments suivants :

- la teneur en leghemoglobine;
- l'activité de la nitrogénase dans les nodules;
- le nombre de nodules;
- la biomasse des racines;
- la croissance des plantules et des feuilles;
- le rendement (effet positif sur le nombre de gousses/plant, graines/plant, poids des graines/plant et poids de 100 graines).

D'autres effets bénéfiques pour le soya comme l'uniformisation de la taille des grains, une meilleure qualité des grains, ou encore un effet de verdeur (retard de la sénescence des feuilles) ont également été observés aux États-Unis (Hershman et al. 2011; Potter 2005c). Il faut toutefois noter qu'un retard de sénescence n'est pas forcément bénéfique puisqu'il peut permettre le développement de maladies en fin de saison (ex. pourriture des graines et des tiges), entraînant ainsi une perte de qualité des grains (Hershman et al. 2011). À l'opposé, dans une autre étude, aucun effet physiologique sur le soya n'a été observé à la suite de l'application de fongicides (Swoboda et Pedersen 2009). L'application de fongicides foliaires dans le soya n'a donc pas toujours un effet physiologique notable. De plus, la plupart des études ayant montré un effet physiologique des fongicides sur le soya ont été réalisées en serre alors que l'effet en champ pourrait être différent.

Il n'existe pas actuellement au Québec d'outils validés qui puissent aider les producteurs à prendre une décision objective quant aux traitements fongicides dans la culture du soya. En Argentine, un outil a été développé pour aider à la décision de traiter ou non un champ avec des fongicides pour lutter contre des maladies survenant tardivement en saison. Dans ce modèle, dix paramètres sont utilisés et différents pointages leur sont attribués selon les situations rencontrées : les précipitations survenues entre le stade R3 et R5, la fréquence des précipitations de plus de 7 mm, la rotation des cultures, le travail du sol, la présence de maladies à la fin de la saison précédente, la qualité des semences, la durée de la saison de croissance (nombre de jours jusqu'au stade R8, soit la maturité), la finalité de la récolte (production de semences ou non), le potentiel de productivité du champ et la présence de maladies en fin de saison dans le champ) (Carmona et al. 2015). Un score supérieur ou égal à 33 indique qu'un gain de rendement est possible à la suite de l'application d'un fongicide foliaire au stade R3, R4 ou R5 selon le nombre de points obtenus, alors qu'un score inférieur à 23 indique que l'application de fongicides a peu de chances d'induire un gain de rendement et de parvenir à être rentable. Ce modèle a été validé puisqu'une marge nette négative a été observée lorsque l'application de fongicides était effectuée lorsque non recommandée, alors que les producteurs obtenaient un revenu plus élevé lorsque le modèle recommandait un traitement et que celui-ci était effectué.

Moments d'application

Selon certaines études, la date d'application des fongicides n'aurait aucun effet sur le rendement (Hanna et al. 2008), notamment si les maladies sont peu présentes (Potter 2005b). Cependant, dans une autre étude, des différences de rendements ont été observées en fonction des dates d'application des fongicides (pyraclostrobine). En effet, il y aurait une augmentation de rendement de 3,5 % (100 kg/ha) pour une application au stade R4 comparativement aux rendements obtenus lors d'une application au stade R2 (Henry et al. 2011). Selon Hershman et al. (2011), la meilleure période d'application des fongicides foliaires (pyraclostrobine) serait au stade R3. Selon la documentation scientifique disponible, il n'y aurait pas de consensus permettant de préciser quel est le meilleur moment pour appliquer des fongicides foliaires chez le soya.

Certains producteurs peuvent se questionner quant à l'intérêt d'ajouter un insecticide lors de l'application d'un fongicide, afin de jouer le rôle d'adjuvant et accroître l'efficacité du fongicide, mais aussi pour lutter contre les ravageurs potentiels. Cependant, cette option ne devrait pas être privilégiée, car elle est coûteuse, dommageable pour l'environnement et s'avère inutile en l'absence de ravageurs (Hershman et al. 2011). **Un insecticide devrait être appliqué uniquement lorsque la pression des ravageurs est élevée et dépasse le seuil d'intervention recommandé** (Hershman et al. 2011). Peu d'informations sont disponibles sur les différents niveaux d'efficacité des applications aériennes versus terrestres ou des applications par hélicoptère versus celles par avion.

Rentabilité économique

Le gain de rendement et la rentabilité des traitements foliaires sont variables et sont donc difficilement prévisibles lorsqu'ils sont effectués en absence de maladies fongiques. L'application de fongicides à titre préventif ne serait pas rentable, car cette pratique procurerait une marge nette négative (Carmona et al. 2015). Au contraire, lorsqu'un traitement était recommandé et qu'il était effectué, un revenu plus élevé était obtenu (Carmona et al. 2015). Plus précisément, une étude rapporte que l'application de fongicides a permis un retour net moyen de 1 000 \$/ha, mais de grandes variations étaient toutefois observées entre les traitements (99-2468 \$/ha) (Henry et al. 2011). Selon Mueller (2014), l'application de fongicides foliaires dans le soya serait rentable si le gain de rendement qui s'en suit était supérieur à 2,3 boisseaux/A soit 155kg/ha (selon les coûts d'application et le prix du soya). Que ce soit aux États-Unis ou en Ontario, l'application de fongicides dans le soya en l'absence de maladie ne serait rentable que dans le tiers (1/3) des cas (Filion et al. 2009). Au Québec, des études ont permis de montrer que l'application de fongicides s'avérait économiquement rentable dans 22 % (Filion et al. 2009) à 33 % des cas (Faucher et Perreault 2013). Cependant, la probabilité que les traitements soient rentables augmente s'il y a présence de maladies fongiques sur la canopée supérieure au stade R5. Des gains économiques ont été observés dans 45 % des cas avec l'utilisation de strobilurine et dans 22,5 % des cas avec l'emploi de triazole en absence de maladies comparativement à une rentabilité dans 80 % des cas si une maladie était présente (Mueller 2014). Des traitements fongicides pourraient aussi être justifiés en cas d'antracnose, de taches brunes, de cercosporose et de pourriture de la tige ou des graines (Hershman et al. 2011).

Afin d'évaluer la rentabilité économique des fongicides foliaires, Belzile (2016) a utilisé la méthode de la budgétisation partielle (BP) sur un ensemble de 45 essais agronomiques portant sur le maïs et le soya et provenant des travaux menés au Centre de recherche sur les grains (CÉROM) entre 2007 et 2014. La BP consiste à mesurer la rentabilité d'un

changement de pratique agricole qui n'affecte pas la structure de l'entreprise (Castle et al. 1987). À la lumière des résultats obtenus dans son analyse, Belzile (2016) conclut que les perspectives de rentabilité de l'utilisation des fongicides foliaires en grandes cultures sont très faibles. Sur la base des résultats agronomiques des essais réalisés dans la culture du soya, l'analyse économique effectuée par Belzile (2016), montre qu'une faible proportion des traitements a mené à un solde positif (3 sur 32). Aussi, les seuils de rentabilité, en termes de rendement à obtenir pour rentabiliser les traitements, sont significativement plus élevés que les gains de rendement réellement obtenus. En moyenne, dans la culture du soya, le gain de rendement nécessaire était généralement de 3.5 % alors que le rendement réel s'est élevé seulement de 0.6 % en moyenne. Cela veut donc dire que les traitements fongicides dans cette culture devraient être pratiquement six fois plus élevés qu'ils ne le sont présentement (Belzile 2016).

Effets indésirables

L'application préventive de fongicides dans le soya pourrait engendrer des répercussions négatives pour la culture. Des applications préventives pourraient provoquer une augmentation des densités de pucerons du soya à la suite de l'élimination des champignons entomopathogènes et des champignons bénéfiques s'attaquant aux insectes. Des chercheurs (Koch et al. 2010) ont en effet montré que l'application de fongicides foliaires pouvait affecter négativement les champignons entomopathogènes s'attaquant au puceron du soya, ce qui pouvait se traduire par une augmentation des populations de pucerons au cours de la saison. L'effet des fongicides sur les populations de pucerons du soya n'a pas été observé dans l'étude de Koch et al. (2010) étant donné les faibles densités de pucerons présentes lors de l'expérimentation, mais pourrait s'avérer significatif lors d'une d'année de forte infestation.

L'application répétée d'une même molécule fongicide peut également favoriser le développement de résistances par les champignons pathogènes, spécialement si les traitements sont effectués de manière préventive. En effet, il est important de noter que les fongicides de la famille des strobilurines ont été classés par le Fungicide Resistance Action Committee (FRAC) comme ayant un haut risque de résistance (Henry et al. 2011).

Solutions alternatives aux fongicides foliaires

L'utilisation de cultivars plus tolérants aux maladies fongiques constitue une solution alternative à l'application des fongicides foliaires. Le Réseau grandes cultures du Québec (RGCCQ) publie annuellement des données relatives à la sensibilité, à la pourriture et aux sclérotés touchant les cultivars de soya. Les producteurs sont aussi invités à s'informer auprès de leurs fournisseurs de semences afin de choisir des cultivars qui soient plus tolérants aux maladies fongiques afin de permettre de contrer les dommages et les pertes liées à ces maladies.

Des méthodes de lutte préventive peuvent aussi permettre de réduire les infestations : la rotation des cultures, l'utilisation de semences saines, le nettoyage de la machinerie (ex. le champignon peut être disséminé par la moissonneuse-batteuse lors de la récolte) ainsi qu'une bonne gestion des mauvaises herbes et des résidus de culture (Dorrance et Lipps 2008).

Maladies fongiques retrouvées au Québec

Pour de plus amples informations sur les maladies fongiques retrouvées au Québec, il est recommandé au lecteur de consulter le document Maladies des grandes cultures au Canada (Bailey et al. 2004). Le tableau 5 présente la synthèse des effets de différentes méthodes de lutte contre les maladies fongiques dans la culture du soya.

Maladie des taches brunes/taches septoriennes (*Septoria glycines*)

Le champignon survit à l'hiver dans les résidus de culture (Dorrance et Mills 2010a; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). La rotation des cultures demeure donc le meilleur moyen de lutte contre la maladie des taches brunes (Dorrance et Mills 2010a; Giesler et Gustafson 2008; Hughes et Esker 2009; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). Un travail du sol post-récolte et l'enfouissement des résidus peuvent aussi permettre de lutter contre la maladie, notamment dans les champs fortement infestés (Dorrance et Mills 2010 a; Giesler et Gustafson 2008). La lutte contre la maladie des taches brunes peut aussi passer par le choix du cultivar. En effet, certains cultivars de soya sont relativement tolérants à la maladie des taches brunes (4 à 13 % de défoliation) alors que d'autres y sont plus sensibles (63 à 84 % de défoliation) (Mahoney et al. 2015).

Plusieurs produits offrent une bonne efficacité contre la maladie des taches brunes (pyraclostrobine, azoxystrobine + propiconazole; Giesler et Gustafson 2008) et la meilleure période d'application se situerait entre les stades R1 et R3 (Esker et al.). Selon Cruz (2008), une application de strobilurine (pyraclostrobine ou azoxystrobine) ou de triazole (tebuconazole) au stade R3 ou R5 permet de réduire l'intensité de la maladie. Dans l'étude de Cruz (2008), l'augmentation de rendement dans les parcelles traitées était de 184 à 490 kg/ha, mais les gains de rendement n'étaient toutefois pas toujours observés, tout particulièrement lors de stress hydriques. Dans une autre étude, l'application de pyraclostrobine a permis de réduire le taux de défoliation attribuable à la maladie des taches brunes (27 % de défoliation avec le traitement contre 45 % pour la parcelle témoin), ce qui s'est traduit par des gains de rendement de 4,2 % (4,49 t/ha pour le traité versus 4,31 t/ha pour le témoin) (Mahoney et al. 2015). Cependant, selon Esker et al. (2008), les infestations doivent être assez importantes pour qu'un gain de rendement soit observé à la suite de l'application de fongicides. L'application d'une forte dose de fongicide biologique (*Bacillus subtilis*) a également permis de réduire significativement l'incidence de la maladie des taches brunes, au même titre que plusieurs fongicides conventionnels (Mantecón 2008). Les gains de rendements observés étaient de 29 à 30 % avec une application de pyraclostrobine + epoxiconazole, de 27 à 29 % avec du trifloxystrobine + cyproconazole, de 22 à 29 % avec de l'azoxystrobine, de 24 à 26 % avec du tebuconazole et enfin de 19 à 24 % avec *B. subtilis* (Mantecón 2008).

Malgré les gains de rendement qui peuvent être observés, l'application de fongicides pour lutter contre la maladie des taches brunes est rarement économiquement rentable et s'avère donc souvent peu recommandée (Dorrance et Mills 2010a; Esker et Conley 2008; Filion et al. 2009; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009). En Ohio, par exemple, l'application de strobilurine (pyraclostrobine ou azoxystrobine) au stade R3 a permis de réduire les infestations de *Septoria*. Des augmentations de rendements n'étaient toutefois observées que dans 50 % des cas. D'autre part, une application de triazoles (flutriafol ou tebuconazole) réalisée au stade R3 ou R5 n'a eu aucune influence sur l'intensité de la maladie ou sur les rendements (Cruz et al. 2010).

En Ontario, l'application d'un fongicide (pyraclostrobine) n'a procuré aucun effet significatif sur les marges bénéficiaires et la rentabilité était variable selon les sites, les années et les cultivars (marge bénéficiaire entre -50 et +53,70 \$/ha; Mahoney et al. 2015).

La décision de traiter devrait reposer sur plusieurs critères : la résistance/sensibilité des cultivars, la date de semis, le rendement potentiel, la pression des maladies aux stades R1-R3, les conditions météorologiques au moment où la maladie est présente ainsi que celles prévues pendant les stades reproductifs, les coûts des fongicides et de leur application ainsi que la valeur des grains sur le marché (Esker et al. 2008). Tel que mentionné pour la rouille asiatique, il est également important de considérer qu'un passage de la machinerie peut occasionner des pertes de rendements, mais que cette perte peut être compensée par un traitement fongicide au stade R1, un semis hâtif et un taux de semis élevé (>250 000 plants/ha) (Hanna et al. 2008).

Cercosporose/taches globuleuses (*Cercospora sojina*)

Le champignon survit à l'hiver dans les résidus des cultures et il est favorisé par des conditions chaudes et humides (Dorrance et Mills 2010b; MAAARO 2009). La maladie est peu fréquente au Canada et a une faible incidence économique (MAAARO 2009). Au Québec, la maladie est également peu fréquente et apparaît généralement tard en saison, ce qui a peu de conséquences sur la récolte (Filion et al. 2009). Cependant, l'incidence de la maladie est en croissance en Ohio depuis quelques années (Dorrance et Mills 2010b) donc elle pourrait l'être également au Canada au cours des prochaines années.

La maladie ne cause habituellement pas de pertes de rendement, sauf si les conditions sont idéales au développement du champignon (Giesler et Gustafson 2008) ou si l'infection a lieu durant la floraison ou avant (peu d'impact si l'infection a lieu au stade R5 et après) (Dorrance et Mills 2010b). Des pertes de rendement jusqu'à 30 % ont toutefois été observées aux États-Unis (Giesler et Gustafson 2008) ainsi qu'une perte de qualité des grains (Dorrance et Mills 2010b).

Les moyens de lutte contre la cercosporose incluent : le choix de cultivars plus résistants, la rotation des cultures (> 2 ans), le travail du sol et l'utilisation de fongicides (Dorrance et Mills 2010b; Giesler et Gustafson 2008; Hughes et Esker 2009; MAAARO 2009; Mueller 2014). Dans le cas de fortes infestations, un travail du sol avec enfouissement des résidus est conseillé (Dorrance et Mills 2010b). Plusieurs fongicides offrent une excellente efficacité contre la cercosporose (ex. pyraclostrobine) voire une très bonne efficacité (Giesler et Gustafson 2008; Wise 2014). Aux États-Unis, un traitement fongicide peut être appliqué du stade floraison (R1) jusqu'au stade remplissage des grains (R5 à R7) (Hughes et Esker 2009). Un traitement peut être rentable si des lésions sont trouvées avant le stade R3 et que le cultivar semé est très sensible (Dorrance et Mills 2010b). Un traitement fongicide peut aussi être efficace et rentable si d'une à deux lésions sont observées sur 25 pieds de rang au stade R2. Cependant, les conditions météorologiques doivent également être prises en compte au moment où la maladie se développe. Au Canada, l'emploi de fongicides pour lutter contre la cercosporose ne s'avère généralement pas rentable, sauf si l'infection est précoce et que le cultivar semé est très sensible (MAAARO 2009). Au Québec, les fongicides pourraient permettre de maîtriser la maladie, mais leur utilisation est toutefois peu justifiée puisqu'il y aurait peu d'incidence de la maladie sur les rendements (Filion et al. 2009). Des traitements préventifs au stade R2 à R3 sont inefficaces (Filion et al. 2009). Enfin, l'usage de fongicides pour lutter contre la cercosporose doit être judicieusement évalué, car plusieurs souches de *Cercospora* résistantes aux strobilurines ont été recensées dans plusieurs états américains (Bradley 2010; Mueller 2014).

Cercosporose tardive/maladie des graines pourpres (*Cercospora kikuchii*)

Le champignon survit à l'hiver au Canada dans les résidus des cultures ou les semences (MAAARO 2009). Les pertes de rendements dues à la maladie sont généralement inexistantes, sauf si les conditions sont propices au développement du champignon (Giesler et Gustafson 2008) et seraient minimales au Canada ((MAAARO 2009). À l'image de la cercosporose, son incidence tardive est faible au Québec, avec des infestations habituellement tardives en saison et sans impacts notables sur les récoltes (Filion et al. 2009).

Les moyens de lutte incluent : l'utilisation de semences saines ou traitées avec un fongicide, l'utilisation de cultivars résistants, la rotation des cultures, le travail du sol (après récolte), l'enfouissement des résidus de culture ou encore l'utilisation de fongicides foliaires (Giesler et Gustafson 2008; ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO) 2009).

Les fongicides à base de pyraclostrobine ou de flutriafol offrent une très bonne efficacité contre la cercosporose tardive tandis que les autres produits offrent une efficacité plus réduite (efficacité acceptable à efficace) (Giesler et Gustafson 2008; Wise 2014). Au Québec, l'utilisation de fongicides foliaires est peu justifiée (comme pour la cercosporose), car ils sont sans incidence sur les rendements et les traitements préventifs au stade R2 à R3 sont inefficaces (Filion et al. 2009).

Pourriture à sclérotés (sclérotiniose) (*Sclerotinia sclerotiorum*)

Le champignon hiverne sous forme de sclérotés (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006). Il peut survivre dans les résidus de cultures jusqu'à 7 ans, mais la germination n'a lieu que si le sclérote se trouve dans les 5 premiers centimètres de sol (Dorrance et Lipps 2008). Au Canada, la maladie est peu fréquente, mais elle peut avoir de lourdes conséquences si un temps frais et humide est observé pendant la floraison (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006). En revanche, il s'agit de la maladie la plus dommageable au Québec, avec des pertes de rendement pouvant aller jusqu'à 20 % (Filion et al. 2009).

Il existe des cultivars de soya plus résistants à la sclérotiniose (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; Filion et al. 2009), mais selon Dorrance et Lipps (2008), ces derniers ne sont pas totalement résistants. D'autres offrent une résistance suffisante pour réduire l'incidence de la maladie. Les méthodes de lutte peuvent également passer par la rotation des cultures (>1 an) en incluant du maïs ou des céréales à paille (Dorrance et Lipps 2008; Filion et al. 2009; Hughes et Esker 2009). Il est conseillé d'éviter de cultiver toute dicotylédone (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006) s'il existe un antécédent de cette maladie dans les champs.

Selon Duval et al. (2015), les sclérotés enfouis à plus de 5 cm dans le sol ne fructifient pas, mais demeurent dormants. Un labour enfouira des sclérotés, mais en ramènera aussi à une profondeur permettant leur fructification. Dans le cas du semis direct et du travail réduit du sol, les sclérotés laissés en surface ou dans les 5 premiers centimètres de sol peuvent fructifier l'année suivante si les conditions sont favorables. S'il y a une culture sensible, elle sera infectée. S'il y a une culture non sensible, elle ne sera pas infectée et les sclérotés qui auront fructifié se dégraderont sans avoir fait de dégâts. Le semis à de plus faibles taux et l'augmentation de l'écartement entre les rangs peuvent aussi permettre de réduire l'incidence de la maladie, surtout si un cultivar très sensible est utilisé et qu'il existe un

historique de maladies dans le champ, bien que cela n'ait pas nécessairement un impact sur les rendements (Dorrance et Lipps 2008).

Les méthodes de lutte incluent également l'utilisation de fongicides foliaires, notamment si un cultivar sensible est semé et si des infestations antérieures de *Sclerotinia* ont déjà causé des pertes de rendement dans le champ en question (Dorrance et Lipps 2008; Hughes et Esker 2009). Quelques fongicides de synthèse offrent une bonne efficacité contre la sclérotiniose (picoxystrobine, flutriafol, prothioconazole, tétraconazole; Wise 2014). En particulier, il a été montré qu'un traitement à base d'azoxystrobine, de prothioconazole ou de pycoxystrobine effectué au stade R1 ou R3 pouvait réduire la gravité de la maladie et se traduire par des augmentations de rendements (Wise 2014). Cependant, selon d'autres auteurs, les fongicides foliaires sont inefficaces pour lutter contre la sclérotiniose (Filion et al. 2009). En revanche, des agents de lutte biologique se sont révélés efficaces pour lutter contre la maladie. Ainsi, l'application au sol des champignons *Coniothyrium minitans* ou *Streptomyces lydicus* a permis une réduction respective de 86 à 94 % et de 81 à 94 % de *Sclerotinia* par kilogramme de grain par rapport au témoin (Zeng et al. 2012). En comparaison, un traitement au boscalide n'avait permis qu'une réduction de 53 à 56 %.

Pourriture des graines/ Phomopsis (*Phomopsis longicolla*)

Le champignon survit à l'hiver au Canada et au Québec dans les graines et les résidus de cultures (Dorrance et Lipps 2009; Filion et al. 2009; MAAARO 2009). Il s'agit de la maladie la plus grave en Ontario occasionnant des pertes de rendement (MAAARO 2009). Au Québec, des pertes de rendement sont possibles, mais la maladie affecte surtout la qualité et la viabilité des graines (Filion et al. 2009).

Les méthodes de lutte incluent un semis tardif, la rotation des cultures (ex. avec du blé ou du maïs), le travail du sol avec enfouissement des résidus de cultures (Dorrance et Lipps 2009; Filion et al. 2009; MAAARO 2009) ou encore l'utilisation de cultivars résistants ou de fongicides foliaires (Soto-Arias et Munkvold 2011; Wrather et al. 2004). Effectuer la récolte lorsque l'humidité des grains se situe entre 13 et 16 % permettrait aussi de réduire l'incidence de la maladie (Dorrance 2004).

L'application de fongicides foliaires (ex. pyraclostrobine ou tébuconazole) au stade R3, R5 ou R3 + R5 réduit dans l'ensemble les infestations, mais cela se traduit rarement par des augmentations de rendement (Soto-Arias 2011; Dorrance 2004). De tels résultats sont observés lorsque le cultivar est sensible ou résistant. En effet, dans une étude, l'application de bénomyl ou d'azoxystrobine sur des cultivars résistants n'a montré aucun effet sur l'intensité des infestations (benomyl: 4 %, azoxystrobine : 3,4 % versus témoin : 2,8 %) (Wrather 2004). Dans cette même étude, l'application de bénomyl sur des cultivars sensibles n'a pas eu d'effet significatif soit 49 % d'infestation avec une application comparativement à 53 % pour le témoin, mais l'application d'azoxystrobine a toutefois fait progresser l'intensité de la maladie à 62 %.

Oïdium (*Microsphaera diffusa*)

Aux États-Unis, les infestations d'oïdium sont assez rares (ex. épidémie tous les 10 à 15 ans au Wisconsin; Grau 2006). Au Canada, l'oïdium a une incidence économique négligeable (MAAARO 2009). Au Québec, l'oïdium apparaît souvent tard en saison et est donc généralement sans impact sur les rendements (Filion et al. 2009).

Des études ont montré que la rotation des cultures avec absence de plantes hôtes pendant plus d'une année (en incluant des cultures comme le maïs ou le blé) pourrait permettre de réduire les infestations d'oïdium (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; Hershman 2012; Hughes et Esker 2009; MAAARO 2009). Un semis hâtif pourrait aussi permettre de réduire l'incidence de cette maladie (Grau 2006), de même qu'un travail du sol ou le traitement des semences à l'aide de fongicides (Hughes et Esker 2009). Mais les méthodes de lutte contre l'oïdium passent avant tout par le choix d'un cultivar résistant (Grau 2006; Hershman 2012; Hughes et Esker 2009), qui selon l'université de l'Illinois, serait le seul moyen de lutte. Certains cultivars de soya sont résistants durant tous les stades de développement, alors que d'autres sont sensibles au cours du stade plantule, puis deviennent résistants à la floraison (University of Illinois 1989).

Selon Grau (2006), le thiophanate-méthyle serait efficace pour lutter contre l'oïdium. De plus, l'application de tébuconazole ou de fertilisant à base de soufre permettrait de réduire la défoliation (tebuconazole : 48 % de défoliation; fertilisant foliaire à base de soufre : 47 %; témoin : 90 %). Cependant, plusieurs études rapportent que l'utilisation de fongicides foliaires pour lutter contre l'oïdium sont inefficaces ou non justifiées puisque sans effet sur les rendements (Filion et al. 2009; Hershman 2012).

Mildiou (*Peronospora manshurica*)

Le champignon responsable du mildiou survit sur les feuilles ou les semences (Bailey et al. 2004), mais les spores proviennent des États-Unis et arrivent au Canada disséminées par le vent. Aux États-Unis, les infestations de mildiou peuvent occasionner des pertes de rendement jusqu'à 14 % (University of Illinois 1989). Au Canada, le mildiou a une incidence économique négligeable (MAAARO 2009). Au Québec, elle est peu fréquente et souvent sans impact sur les rendements (Filion et al. 2009) bien que la qualité des récoltes peut être affectée.

Puisque la dispersion des spores peut se faire sur de longues distances, la rotation des cultures est sans incidence sur le développement de la maladie (Grau 2006). Cependant, d'autres études ont montré que la rotation des cultures avec absence de plantes hôtes pendant plus d'une année (en incluant des cultures comme le maïs ou le blé) pourrait permettre de réduire les infestations de mildiou (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2006; Hershman 2012; Hughes et Esker 2009; MAAARO 2009). Un semis hâtif pourrait aussi permettre de réduire l'incidence de la maladie (Grau 2006), de même qu'un travail du sol ou le traitement des semences à l'aide de fongicides (Hughes et Esker 2009). En effet, le traitement des semences permet de réduire la dissémination du mildiou par les semences contaminées (MAAARO 2009). Les méthodes de lutte contre le mildiou passent avant tout par le choix d'un cultivar résistant (Grau 2006; Hershman 2012; Hughes et Esker 2009), qui selon l'université de l'Illinois, serait le seul moyen de lutte. Certains cultivars de soya sont résistants durant tous les stades de développement, alors que d'autres sont sensibles au cours du stade plantule, puis deviennent résistants à la floraison (University of Illinois 1989).

Plusieurs études rapportent que l'utilisation de fongicides foliaires pour lutter contre le mildiou sont inefficaces ou non justifiées puisque sans effet sur les rendements (Filion et al. 2009; Hershman 2012).

Tableau 5 : Effets de différentes méthodes de lutte contre les maladies fongiques du soya

Méthode de lutte	Rouille	Taches brunes	Cercosporose	Cercosporose tardive	Sclérotiniose	<i>Phomopsis</i>	Oïdium/Mildiou
Fongicides foliaires	+	±	±	±	±	0	±
Traitement des semences	ND	ND	ND	ND	ND	ND	+
Fongicides biologiques	ND	±	ND	ND	+	ND	ND
Cultivars plus résistants	±	+	+	+	++	+	+
Rotation des cultures	0	+	+	+	+ ¹	+	±
Travail du sol	0	+	+	+	+ ¹	+	+
Enlèvement des résidus	0	+	+	+	ND	+	+
Gestion des mauvaises herbes	ND	ND	ND	ND	+	ND	ND
Date de semis	+	+	ND	ND	ND	+	+
Taux de semis	*	+	ND	ND	±X	ND	ND
Écartement entre les rangs	*	ND	ND	ND	±X	ND	ND

+ : effet positif (méthode efficace contre la maladie), 0 : sans effet (non efficace), ± : effet mitigé ou sans incidence économique notable, ND : non documenté. En grisé : méthode de lutte la plus efficace, * Effet sur l'application de fongicide foliaire

¹ Après une infestation, un travail superficiel du sol jumelé à une rotation avec une céréale à paille ou du maïs permet de réduire la quantité de sclérotés du champ.

Littérature citée

- Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2006. Profil de la culture du soja au Canada. pp. 52
- Bailey K. L., Couture L., Gossen B.D., Gugel R.K., et Morrall R.A.A. 2004. Maladies des grandes cultures au Canada. 1^{re} édition. Société canadienne de phytopathologie. 332 pages.
- Belzile L. 2016. Utilisation des fongicides foliaires en grandes cultures (volet économique). Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 19 p. Disponible à l'adresse : <http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/rapportfinalfongicidesfoliairesgrandescultures.pdf>
- Bradley C. A. 2010. Frogeye Leaf Spot Pathogen with Reduced Sensitivity to Fungicides Found in Tennessee Soybean Field. University of Illinois Extension Bulletin(24):172.
- Carmona M., Sautua F., Perelman S., Gally M. et Reis E.M. 2015. Development and validation of a fungicide scoring system for management of late season soybean diseases in Argentina. Crop Prot.
- Carmona M., Sautua F., Perelman S., Reis E.M. et Gally M. 2011. Relationship between late soybean diseases complex and rain in determining grain yield responses to fungicide applications. J. Phytopathol. 159(10):687-693.
- Cruz C.D. 2008. Impact of foliar diseases on soybean in Ohio : frogeye leaf spot and Septoria Brown spot. Master of Science, Plant Pathology, The Ohio State University, 125 p.
- Cruz C.D, Mills D., Paul P.A. et Dorrance A.E. 2010. Impact of brown spot caused by *Septoria glycines* on soybean in Ohio. Plant disease 94(7):820-826.
- Dorrance A.E. 2004. Soybean Rust. Agronomic Crop Disease Fact Sheet. Ohio State University Extension.
- Dorrance A. E., Cruz C., Mills D. 2010. Effects of Foliar Fungicide and Insecticide Applications on Soybean in Ohio. Plant Management Network
- Dorrance A.E. et Lipps P.E. 2008. Sclerotinia Stem Rot (White Mold) of Soybean. Agriculture and Natural Resources Fact Sheet. Ohio State University Extension, 3 p.
- Dorrance A.E. et Lipps P.E. 2009. Phomopsis Seed Rot of Soybeans. Agriculture and Natural Resources Fact Sheet. Ohio State University Extension, 2 p.
- Dorrance A.E. et Mills D.R. 2010 a. Brown Spot of Soybeans. Agriculture and Natural Resources Fact Sheet. Ohio State University Extension, 2 p.
- Dorrance A.E. et Mills D.R. 2010b. Frogeye Leaf Spot of Soybean. Agriculture and Natural Resources Fact Sheet. Ohio State University Extension, 3 p. Disponible à l'adresse : <http://ohioline.osu.edu/ac-fact/pdf/0053.pdf>
- Duval, B., S. Rioux, C.-O. Laporte, C. Parent et J. Breault. 2015. La pourriture à sclérotés chez le soya (Mise à jour du bulletin d'information paru le 11 septembre 2009). Bulletin d'information no 20, 10 juillet. Réseau d'avertissements phytosanitaires du Québec. Disponible à l'adresse : <http://www.agrireseau.qc.ca>.

Esler P., Conley S. et Lauer J. 2008. Foliar Fungicides for Corn and Soybean – Don't Rush to Spray. Cool Bean Advisor, University of Wisconsin - Extension, CoolBean.info, CoolBean.info, 3 p. Disponible à l'adresse : http://www.coolbean.info/pdf/soybean_research/mid_late_season/Dont_Rush_To_Spray.pdf

Esler P. et Conley S.P. 2009. Considerations for Spraying Foliar Fungicides in Soybean. Cool Bean Advisor, University of Wisconsin - Extension, CoolBean.info, 3 p. Disponible à l'adresse : http://www.coolbean.info/pdf/soybean_research/mid_late_season/Foliar_Fungicide_Considerations.pdf

Faucher Y. et Perreault Y. 2013. Essais soya 2013. Journée Grandes cultures, Saint-Rémi-de-Napierville, 3 décembre 2013.

Filion P., Rioux S. et Tremblay G. 2009. Avons-nous besoin de fongicides pour le soya au Québec. Réseau d'avertissements phytosanitaires - Bulletin d'information - Grandes cultures n° 3 - 28 avril 2009. Agri-réseau, Québec, 8 p. Disponible à l'adresse : <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/b03gc09.pdf>

Giesler L.J. et Gustafson T. C. 2008. Foliar Fungicide Use in Soybean. Nebguide G1862

Grau C. 2006. Powdery Mildew of Soybean. University of Wisconsin-Extension, Madison, Wisconsin (USA), 2 p. Disponible à l'adresse : <https://ipm.illinois.edu/diseases/rpds/508.pdf>

Hanna S., Conley S., Shaner G. et Santini J. 2008. Managing Fungicide Applications in Soybean. Purdue Extension. 3 p. Disponible à l'adresse : <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/sps/sps-103-w.pdf>

Henry R.S., Johnson W.G. et Wise K. A. 2011. The impact of a fungicide and an insecticide on soybean growth, yield, and profitability. Crop Prot. 30(12):1629-1634.

Hershman D.E. 2012. Downy Mildew of Soybeans. University of Kentucky - Cooperative Extension service, 2 p.

Hershman D.E., Vincelli P. et Kaiser C.A. 2011. Foliar Fungicide Use in Corn and Soybeans. Plant Pathology Fact Sheet, University of Kentucky, Plant Pathology Extension, p. Disponible à l'adresse : http://www2.ca.uky.edu/agcollege/plantpathology/ext_files/PPFShtml/PPFS-GEN-12.pdf

Hughes T. et Esler P. 2009. Visual quick guide to common soybean diseases in Wisconsin. p. Disponible à l'adresse: <http://learningstore.uwex.edu/assets/pdfs/A3879-01.pdf>

Joshi J., Sharma S. et Guruprasad K. N. 2014. Foliar application of pyraclostrobin fungicide enhances the growth, rhizobial-nodule formation and nitrogenase activity in soybean (var. JS-335). Pestic. Biochem. Physiol. 114(1):61-66.

Koch K.A., Potter B.D. et Ragsdale D.W. 2010. Non-target impacts of soybean rust fungicides on the fungal entomopathogens of soybean aphid. J. Invertebr. Pathol. 103(3):156-164.

Mahoney K. J., Vyn R.J. et Gillard C.L. 2015. The effect of pyraclostrobin on soybean plant health, yield, and profitability in Ontario. Can. J. Plant Sci. 95(2):285-292.

Mantecón J.D. 2008. Efficacy of chemical and biological strategies for controlling the soybean brown spot (*Septoria glycines*). Cienc. Invest. Agrar. 35 (2):173-176.

Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO). 2009. Maladies des grandes cultures : Maladies du soya. pp. 233-240

Mueller D.S. 2014. Are Fungicides Useful in Soybean Production? In: Proceedings of the Agri-Vision, Saint-Hyacinthe, 3 décembre 2014.

Nelson K.A., Motavalli P.P., Stevens W.E., Dunn D. et Meinhardt C. G. 2010. Soybean response to preplant and foliar-applied potassium chloride with strobilurin fungicides. Agron. J. 102(6):1657-1663.

Potter B. 2005a. Foliar fungicide effects on soybean disease suppression, senescence and yield. University of Minnesota, Southwest Research and Outreach Center 8 p.

Potter B. 2005b. Foliar fungicide timing and interaction with soybean maturities: Effect on soybean disease suppression and yield. University of Minnesota, Southwest Research and Outreach Center, 6 p.

Potter B. 2005c. Triazole and Strobilurin foliar fungicide effects on soybean disease suppression, senescence and yield. University of Minnesota, Southwest Research and Outreach Center, 5 p.

Rioux S., Tremblay G. et Lafontaine P. 2011. Évaluation de l'application de fongicide dans la culture de maïs-grain et de soya en parcelles expérimentales. Rapport final réalisé dans le cadre du programme Prime-Vert, sous-volet 11.1 – Appui à la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture et Agroalimentaire Canada. Québec, pp. 7

Smith D. 2015. Utility of Fungicides in Corn & Soybeans. Corn/Soy Expo, Wisconsin Dells, Wisconsin (USA), 29-30 janvier 2015.

Soto-Arias J.P. et Munkvold G.P. 2011. Impacts of foliar fungicides on infection of soybean by *Phomopsis* spp. in Iowa, USA. Crop Prot. 30 (5):577-580.

Swoboda C. et Pedersen P. 2009. Effect of fungicide on soybean growth and yield. Agron. J. 101(2):352-356.

University of Illinois. 1989. Powdery mildew of soybeans. Reports on Plant Diseases n° 508, 3 p. Disponible à l'adresse : <https://ipm.illinois.edu/diseases/rpds/508.pdf>

Villamil M.B., Davis V.M. et Nafziger E.D. 2012. Estimating factor contributions to soybean yield from farm field data. Agron. J. 104(4):881-887.

Weidenbenner N.H., Rowntree S.C., Wilson E.W. 2014. Fungicide management does not affect the rate of genetic gain in soybean. Agron. J. 106(6):2043-2054.

Wise K.A. 2014. Fungicide Efficacy for Control of Soybean Foliar Diseases. Purdue Extension. 3 p. Disponible à l'adresse : <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/BP/BP-161-W.pdf>

Wrather J.A., Shannon J.G., Stevens W.E., Slepser D. A. et Arelli A.P. 2004. Soybean cultivar and foliar fungicide effects on *Phomopsis* sp. seed infection. Plant disease 88(7):721-723.

Zeng W., Kirk W. et Hao J. 2012. Field management of Sclerotinia stem rot of soybean using biological control agents. Biol. Control 60(2):141-147.

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

Québec 