

Modélisation et simulation prévisionnelle de la septoriose et rouille brune des feuilles pour une gestion durable du blé d'hiver

Moussa El Jarroudi⁽¹⁾, Bernard Tychon⁽¹⁾, Lucien Hoffmann⁽²⁾ et Henri Maraite⁽³⁾

⁽¹⁾ Université de Liège, Département en Sciences et Gestion de l'Environnement, 185 Avenue de Longwy, B-6700 Arlon, Belgique - meljarroudi@ulg.ac.be ⁽²⁾ Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann, Département Environnement et Agro-biotechnologies (EVA), 41 Rue du Brill, L-4422 Belvaux, Luxembourg ⁽³⁾ Unité de Phytopathologie, Université catholique de Louvain (UCL), Croix du Sud 2/3, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

1 - Introduction

Malgré sa petite taille, le GDL est doté d'une variation microclimatique importante entre le Nord (Oesling) et le Sud (Gutland) qui est à l'origine d'une distribution géographique contrastée des maladies cryptogamiques du blé d'hiver entre ces deux régions. Au GDL, les paramètres climatiques sont des facteurs déterminants des maladies cryptogamiques, tandis que les pratiques culturales (la fumure azotée, choix variétal, précédent cultural...) sont des facteurs secondaires. C'est le climat qui gouverne en grande partie les changements aux niveaux de la pression parasitaire, de l'expression des symptômes, du développement de l'épidémie mais aussi de la population hôte. La septoriose des feuilles causée par la forme conidienne *Septoria tritici* Roberge ex Desmazières, téléomorphe *Mycosphaerella graminicola* (Fuckel) Schröter ex Cohn, est la principale maladie foliaire affectant la culture du blé d'hiver au G-D de Luxembourg (El Jarroudi *et al.*, 2009a). Cette maladie cause une perte significative du rendement dans beaucoup de surfaces emblavées en culture de blé (Eyal *et al.*, 1985 ; King *et al.*, 1983 ; Royle *et al.*, 1986 ; Royle *et al.*, 1993 ; Shaw and Royle, 1993), notamment lorsque les deux dernières feuilles sont sévèrement attaquées (Shaw and Royle, 1989 ; Thomas *et al.*, 1989). Par exemple, au GDL, cette maladie est responsable d'une perte de rendement de 20 à 30 % si la dernière feuille est sévèrement attaquée pendant la maturité du blé (El Jarroudi, 2005). Entre 2003 et 2009, la sévérité (pourcentage de la surface foliaire présentant des lésions dues à *S. tritici*) était forte au Gutland et faible dans l'Oesling (El Jarroudi *et al.*, 2011b). Pour les années 2006, 2008 et 2009, la maladie n'atteignait même pas 6 % dans l'Oesling alors qu'elle dépassait les 40 % au Gutland (El Jarroudi *et al.*, 2011a).

Entre 2003 et 2005, la maladie apparaissait entre les stades GS77 (maturité laiteuse) (Zadoks *et al.*, 1974) et GS87 (maturité pâteuse). Cependant, entre 2006 et 2009, la maladie apparaissait déjà dès le stade GS45 (gonflement) (El Jarroudi *et al.*, 2009b). L'apparition plus précoce de la maladie est principalement liée à l'augmentation progressive et significative de la température printanière (El Jarroudi *et al.*, 2009b). Plus spécifiquement, en 2003 et en 2007, le site de Burmerange (site avec des températures printanières élevées, 13,6 °C et 14 °C respectivement) a connu une forte sévérité de la maladie de 66 % et 57 %, respectivement tandis que la sévérité de la maladie était très faible (< 1% pour les deux années) au Nord du pays (exemple du site de Reuler caractérisé par de faibles températures printanières, 12,0 °C et 12,4 °C pour 2003 et 2007 respectivement). Le site de Christnach, situé entre Burmerange et Reuler, a montré un niveau intermédiaire de sévérité avec 7 % et 22 %, respectivement (El Jarroudi *et al.*, 2009b). Enfin, Everlange a montré un niveau de sévérité de 4 % pour les deux années. L'influence des conditions climatiques sur les différents processus du cycle

primaire de la rouille brune a été largement étudiée (De Vallavieille-Pope *et al.*, 1995 ; De Vallavieille-Pope *et al.*, 2000 ; Eversmeyer and Kramer, 2000 ; Eversmeyer *et al.*, 1980 ; Moschini and Pérez, 1999 ; Nagarajan *et al.*, 1977 ; Sache, 2000). La présence d'eau libre sur la surface de la feuille sous forme de gouttelettes de rosée est essentielle pour la germination des urédospores tandis que la lumière l'inhibe. Ainsi les infections se déroulent préférentiellement la nuit.

Deux modèles ont été développés pour la septoriose et la rouille brune. Un modèle pour la septoriose basé sur une approche mécaniste et un modèle pour la rouille brune basé sur une approche stochastique. L'objectif de ces modèles est d'aider les agriculteurs à définir le moment optimum de traitement fongicide.

2 - Matériels et méthodes

La septoriose et la rouille brune ont été suivies sur 4 sites expérimentaux, représentatifs des situations agroclimatologiques du GDL (Fig. 1).

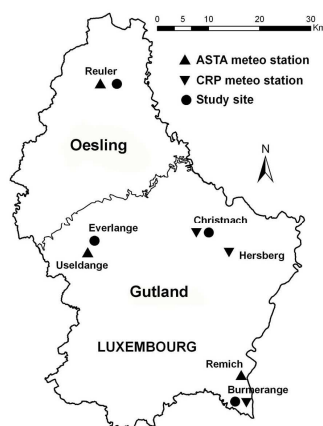


Figure 1. Localisation des sites expérimentaux au GDL. ASTA-Administration des Services Techniques de l'Agriculture ; CRP-Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann.

La détermination de la surface foliaire présentant des symptômes de la septoriose et de la rouille brune a été faite sur 10 plantes par parcelles en 4 répétitions (parcelles témoins) en se basant sur les échelles de détermination de James (James, 1971) et le logiciel Distrain qui permettent une estimation correcte de la surface présentant des nécroses et des chloroses. Le suivi des maladies a été fait depuis fin avril (stade montaison) jusqu'au début juillet (stade maturité).

La calibration et la validation de PROCULTURE ont été réalisées entre 2000 et 2002. Elles ont été faites selon les conditions topoclimatiques et phytotechniques luxembourgeoises (variétés différentes, date de semis, fumure azotée, travail du sol...). La validation de PROCULTURE a été basée sur les tables de contingence (Tableau 1) qui permettent de calculer les différents scores statistiques nécessaires pour tester la qualité de simulation.

Les scores statistiques calculés sont : Probabilité de détection (POD), fausses alertes (FAR), Indice de succès (CSI). Ces scores statistiques se calculent par les formules suivantes : $POD = a/(a + c)$; $FAR = b/(a + b)$, et $CSI = a/(a + b + c)$ (Wilks, 1995).

Tableau 1. Table de contingence utilisée pour tester les simulations de PROCULTURE.

	Valeurs Observées	Total simulées
--	-------------------	----------------

		Oui	Non	
Valeurs simulées	Oui	a (Succès)	b (Fausses alertes)	a + b
	Non	c (Échecs)	d (rejet justifié)	c + d
Total Observées		a + c	b + d	

La conception du modèle de rouille brune a été faite sur base de données d'observations récoltées entre 2000 et 2003. L'originalité de ce modèle est basée sur une approche stochastique et sur l'utilisation de données météorologiques nocturnes (entre 20 heures et 6 heures du matin car la lumière inhibe la germination) pour prévoir le développement de la maladie pendant la période de croissance du blé, c'est-à-dire entre la montaison et la fin de la maturité.

3 - Résultats et Discussions

3.1 - Simulation de la septoriose

La validation de PROCULTURE a été réalisée au GDL entre 2000 et 2002 (Tableau 2, Fig. 2). Avec un pourcentage de réussite oscillant entre 85 % et 95 %, PROCULTURE est devenu une plateforme indispensable pour une agriculture durable à l'échelle parcellaire au GDL.

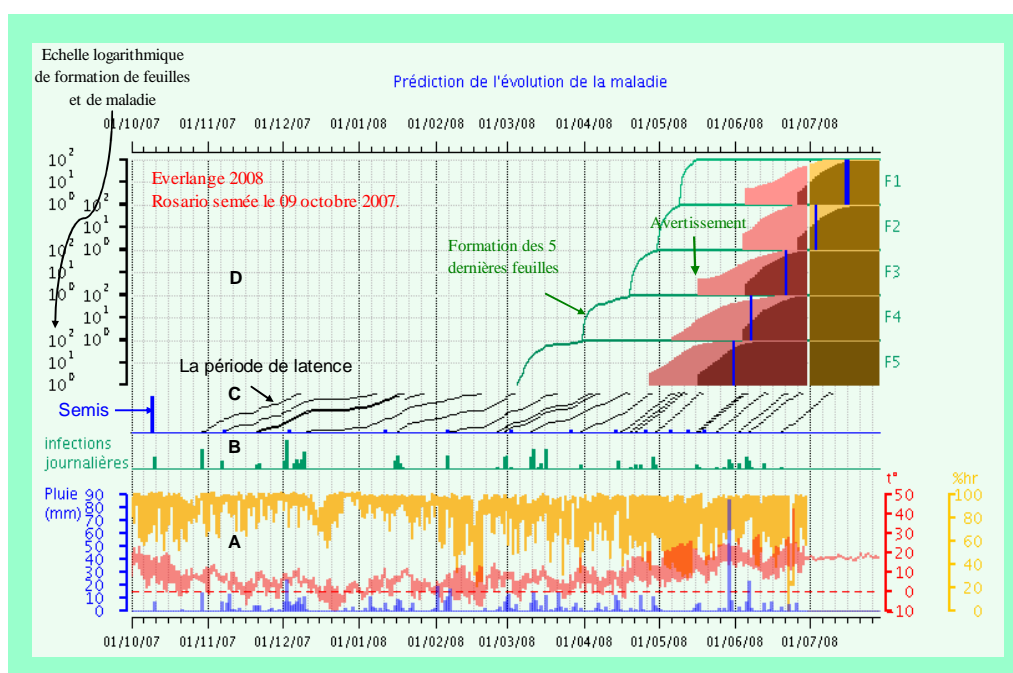


Figure 2. Les sorties de PROCULTURE pour les simulations du risque de la septoriose des feuilles du blé d'hiver pour l'année 2008 à Everlange.

A : Valeurs journalières de la température moyenne de l'air (°C), de l'humidité relative (%) et de la pluie (mm) mesurée à Everlange (2008) - B : Nombre d'heures par jour des plus importantes probabilités d'infection - C : La période de latence, D : Lignes : développement de la surface foliaire (échelle logarithmique) des 5 dernières feuilles F5 à F1 (F1 est la dernière feuille formée), rose : quantification des symptômes issus de l'infection primaire des feuilles F5 à F1, rose foncé : les symptômes issus des infections secondaires.

Tableau 2. Synthèse de la validation de PROCULTURE au Grand-Duché de Luxembourg entre 2000 et 2002.

Sites	Variétés	Année	Scores		
			POD	FAR	CSI
Everlange	Bussard	2000	0.90	0.00	0.90
		2001	0.98	0.12	0.87
Reuland	Bussard	2000	0.96	0.00	0.96
		2001	1.00	0.10	0.90
Everlange	Achat	2002	1.00	0.06	0.94
	Drifter	2002	0.94	0.09	0.84
Everlange	Dream	2000	0.94	0.16	0.79
		2001	1.00	0.22	0.78
Reuland	Dream	2000	0.98	0.00	0.98
		2001	0.92	0.39	0.58

Depuis 2004, les données fournies par PROCULTURE sont incluses dans les bulletins d'avertissements hebdomadaires, diffusés via le journal agricole luxembourgeois (« De Letzeburger Bauer ») et via le site internet de la Chambre d'Agriculture. Cette diffusion a permis d'élargir le champ d'action de PROCULTURE en incluant des sites représentant les principales régions céréalières du GDL.

Ainsi, les habitudes des agriculteurs ont évolué, favorisant la production de qualité sans avoir recours systématiquement au double, voire au triple traitement basé uniquement sur le stade phénologique. Entre 2003 et 2009, la rentabilité du traitement recommandé par le modèle est 80 % supérieure aux autres traitements.

Des collaborations ont été établies avec de nombreuses institutions en France, en Italie, au Maroc, en Arménie, en Australie et également en Argentine pour utiliser ce logiciel dans leurs avertissements agricoles. En France, cette collaboration a été établie avec l'INRA Paris Grignon, pour élaborer un cahier des charges permettant de mettre en place un réseau de parcelles expérimentales et/ou agricoles présentant des situations agronomiques, micro-climatiques et épidémiologiques contrastées. La confrontation des connaissances obtenues dans deux régions de production (Ile-de-France et Luxembourg) présentant des caractéristiques agro-écologiques différentes permettra de mieux appréhender la variabilité des épidémies. Cette approche permettra également de confronter PROCULTURE à des situations agronomiques contrastées pour encore mieux préciser de l'effet des variables micrométéorologiques, épidémiologiques et phénologiques. En Australie, c'est surtout, la spatialisation des avertissements de la septoriose du blé d'hiver donnés par PROCULTURE en utilisant des données radars (Mahtour *et al.*, 2011).

3.2 - Simulation de la rouille brune

Les paramètres météorologiques déterminants du modèle sont des températures nocturnes comprises entre 8 et 16 °C associées à des humidités supérieures à 60 % pendant au moins 12 heures consécutives. Ces dernières conditions sont fortement corrélées avec l'augmentation du pourcentage de la surface foliaire présentant des symptômes (Tableau 3).

Tableau 3. Coefficient de détermination établi entre le modèle de prédiction de la rouille brune et le taux de maladie observée (entre l'apparition de la première pustule début mai au 10 juillet) sur les

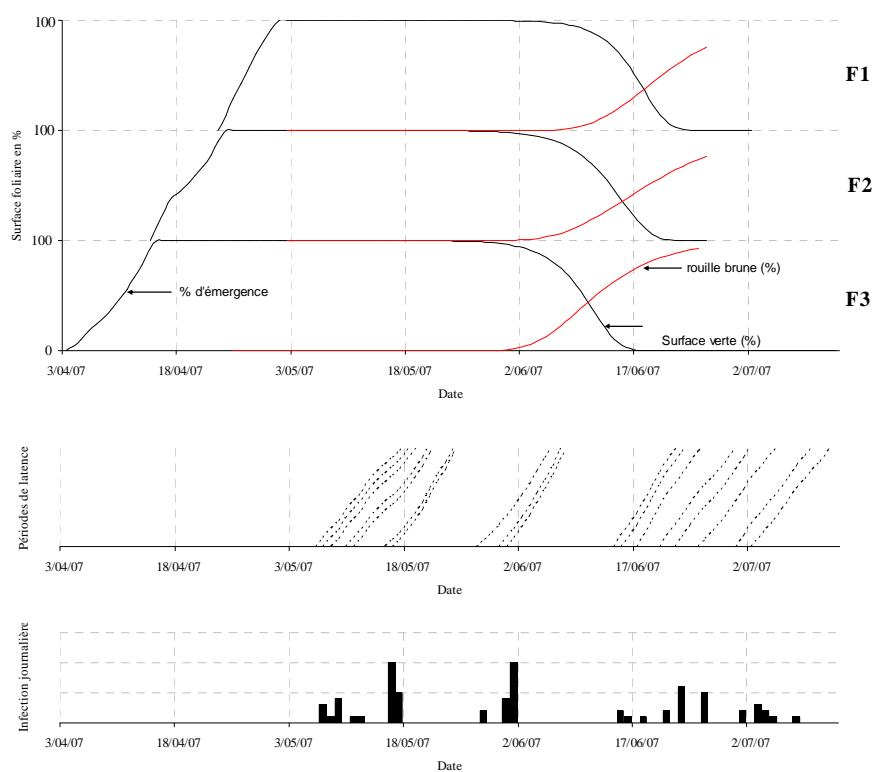
deux dernières feuilles (F1, F2, F1 étant la dernière formée) entre 2000 et 2003 dans les trois sites d'essais. ^a Test de signification : * = P < 0.05.

Humidité	Température	F1	F2
H > 60 %	8 < T < 16 °C	0.87* ^a	0.76*
H > 70 %	8 < T < 16 °C	0.86*	0.78*
H > 80 %	8 < T < 16 °C	0.79*	0.73*

Le modèle de prédiction s'appuie sur le critère nécessaire et suffisant de 12 heures consécutives montrant des températures nocturnes comprises entre 8 et 16 °C associées à des humidités relatives de l'air supérieures à 60 %.

La validation du modèle a été faite sur la période 2004 à 2009. Une étude de régression a été faite entre le nombre d'infections donné par le modèle entre le 1^{er} mai et le 1^{er} juillet de 2004 à 2009 et le pourcentage de rouille brune observé sur F1 et F2 à Burmerange et Christnach. Cette étude a révélé une bonne concordance du modèle avec les données d'observation de la maladie (R² de 80 % pour la F1 [dernière feuille formée] et proche de 85 % pour la F2, P < 0.05). Avec un pourcentage de réussite oscillant entre 80 et 85 %, le modèle semble être une plate-forme indispensable pour une agriculture raisonnée au GDL. Le modèle a, en effet, permis de prévoir à temps les fortes pressions de la maladie en 2007 (Fig. 3) et 2009, même pour le Nord du pays où traditionnellement la pression de maladie est la plus faible. Une collaboration a été établie avec l'équipe de recherche de l'Université Paris-Grignon, l'Université catholique de Louvain – Louvain-la-Neuve, Centre de Recherche Agronomique de Gembloux et l'Université de Bologne en Italie pour évaluer le modèle au niveau de ces pays et en croisant les différentes approches et base de données respectives.

Figure 3. Simulation du risque d'infection de la rouille brune en 2007 à Christnach (variété : Tommi semée le 12 octobre 2006). Les courbes rouges représentent l'évolution de la surface foliaire affectée par la rouille brune (%), les courbes noires représentent l'évolution de l'émergence et de la dégradation de la surface verte (%). Les courbes de la latence démarrent au moment de l'infection et le sommet représente le moment d'apparition de symptômes.



Mots clés : blé d'hiver, avertissement, lutte dirigée, modèle, septoriose, rouille brune, PROCULTURE.

Bibliographie

- De Vallavieille-Pope C, Huber L, Leconte M et Goyau H** (1995) Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration and infection of *P. recondita* f. sp. *tritici* and *P. striiformis* on wheat seedlings. *Phytopathology* **85**: 409-415
- De Vallavieille-Pope C, Giosue S, Munk L, Newton AC, Niks RE, Østergård H, Pons-kühnemann J, Rossi V et Sache I** (2000) Assessment of epidemiological parameters and their use in epidemiological and forecasting models of cereal airborne disease. *Agronomie* **20**: 715-727
- El Jarroudi M** (2005) Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg : Calibration et validation d'un modèle de prévision, PhD thèse Université de Liège, Arlon. pp. 250
- El Jarroudi M, Delfosse, Maraite H, Hoffmann L et Tychon B** (2009a) Assessing the accuracy of simulation model for Septoria leaf blotch disease progress on winter wheat. *Plant Dis.* **93**: 983-992. DOI : doi : 10.1094/PDIS-93-10-0983
- El Jarroudi M, Giraud F, Tychon B, Hoffmann L, Maraite H et Delfosse P** (2011a) Prévoir la septoriose Un modèle belge au Luxembourg. Modélisation et simulation prévisionnelle de la septoriose des feuilles par PROCULTURE pour une gestion durable du blé d'hiver. *Phytoma - La défense des végétaux* **642**: 43-46
- El Jarroudi M, Giraud F, Vrancken C, Junk J, Tychon B, Hoffmann L et Delfosse P** (2009b) First report of wheat leaf rust in the Grand Duchy of Luxembourg and the progress of its appearance over the 2003-2008 period. *Plant Disease* **93** : 971-971. DOI : doi : 10.1094/PDIS-93-9-0971A
- El Jarroudi M, Giraud F, Delfosse P, Kouadio L, Hoffmann L, Maraite H et Tychon B** (2011b) Regional-based typology of the main fungal diseases affecting winter wheat in the Grand-Duchy of Luxembourg. *Phytopathology* **101**: S47-S48
- Eversmeyer MG et Kramer CL** (2000) Epidemiology of wheat leaf and stem rust in the Central Great Plains of the USA. *Annual Review of Phytopathology* **38**: 491-513. DOI : doi : 10.1146/annurev.phyto.38.1.491
- Eversmeyer MG, Kramer CL et Browder IE** (1980) Effect of temperature and host : parasite combination on the latent period of *Puccinia recondita* in seedling wheat plants. *Phytopathology* **70**: 938-941
- Eyal Z, Scharen AL, Huffman MD et Prescott JM** (1985) Global insights into virulence frequencies of *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology* **75**: 1456-1462
- James CA** (1971) Manual of assessment Keys for Plant Diseases. Canada Department of Agriculture. Publication No.1458, APS, St.Paul, MN, USA
- King JE, Cook RJ et Melville SC** (1983) A review of *Septoria* diseases of wheat and barley. *Ann. Appl. Biol.* **103**: 345-373
- Liu JQ et Kolmer JA** (1997) Inheritance of Leaf Rust Resistance in Wheat Cultivars Grandin and CDC Teal. *Plant disease* **81**: 505-508. DOI : doi : 10.1094/PDIS.1997.81.5.505
- Mahtour A, El Jarroudi M, Delobbe L, Hoffmann L, Maraite H et Tychon B** (2011) Site-specific Septoria leaf blotch risk assessment in winter wheat using weather-radar rainfall estimates. *Plant Dis.* **95**: 384-393. DOI : doi : 10.1094/PDIS-07-10-0482
- Moschini RC et Pérez BA** (1999) Predicting Wheat Leaf Rust Severity Using Planting Date, Genetic Resistance, and Weather Variables. *Plant disease* **83**: 381-384. DOI : doi : 10.1094/PDIS.1999.83.4.381
- Nagarajan S, Singh H, Joshi LM et Saari EE** (1977) Prediction of *Puccinia graminis* f.sp. *tritici* on wheat in India by trapping the uredospores in rain samples. *Phytoparasitica* **5**: 104-108
- Royle DJ, Shaw MW et Cook RJ** (1986) Patterns of development of *Septoria nodorum* and *S. tritici* in some winter wheat crops in Western Europe 1981-83. *Plant Pathol.* **35**: 466-476
- Royle DJ, Lovell DJ, Coakley SM et Shaner G** (1993) Predicting the effects of climate change on *Septoria tritici* on winter wheat, Abstracts of the 6th International Congress of Plant Pathology, Montreal, Canada
- Sache I** (2000) Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain. *Agronomie* **20**: 757-767
- Shaw MW et Royle DJ** (1989) Estimation and validation of function describing the rate at which *Mycosphaerella graminicola* causes yield loss in winter wheat. *Ann. Appl. Biol.* **115**: 425-442
- Shaw MW et Royle DJ** (1993) Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) on winter wheat in the U.K. *Plant Pathol.* **42**: 882-899
- Thomas MR, Cook RJ et King JE** (1989) Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its affect on yield. *Plant Pathology* **38**: 246-257
- Wilks DS** (1995) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic press, San Diego, CA
- Zadoks JC, Chang TT et Konzak CF** (1974) A decimal code for the growth stages of cereals weeds. *Research* **14**: 415-421