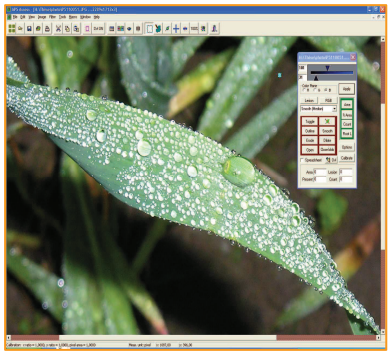
Université de Liège
Département des Sciences et
Gestion de l'Environnement
Unité Eau et Environnement
Arlon.

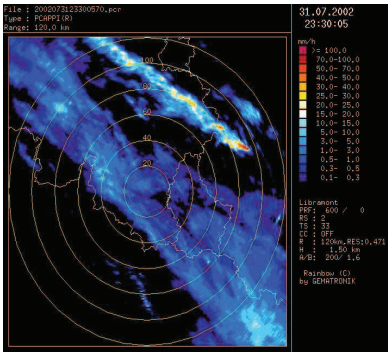
Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en sciences et gestion de l'environnement

par

Abdeslam MAHTOUR

Images radar des précipitations et durée d'humectation simulée pour l'évaluation des risques potentiels d'infection du blé d'hiver par la septoriose





Jury :

Pr. M. Erpicum,	Université de Liège (Liège, Belgique),	**Président**
Dr. L. Delobbe,	Institut Royal Météorologique (Bruxelles, Belgique),	**Membre**
Dr. M. El Jarroudi,	Université de Liège (Arlon, Belgique),	**Membre**
Pr. L. Hoffmann,	CRP-GL, Département Environnement et Agro-biotechnologies (G-D de Luxembourg),	**Membre**
Dr. R. Oger,	Centre Wallon de Recherches Agronomiques (Gembloux, Belgique),	**Membre**
Dr. B. Tychon,	Université de Liège (Arlon, Belgique),	**Promoteur**

Année académique 2009-2010

SOMMAIRE

RÉSUMÉ 7

INTRODUCTION GÉNÉRALE 8

CONTEXTE GÉNÉRAL 10

ÉPIDÉMIOLOGIE DE LA CULTURE DU BLÉ D'HIVER AU G-D DE LUXEMBOURG 12

IMPACT DE L'HUMECTATION SUR LA PROTECTION DES PLANTES 16

APPLICATION DU RADAR MÉTÉOROLOGIQUE DANS LA PRÉVISION DES RISQUES ÉPIDÉMIQUES 19

PROBLÉMATIQUE ET APPROCHE ENVISAGÉE 22

POSITIONNEMENT DE NOTRE TRAVAIL DANS LE CADRE D'UNE PRÉVISION ÉPIDÉMIQUE 22
OBJECTIFS DE LA RECHERCHE 22
PRIORITÉ DANS LE CADRE DE LA THÈSE 23
HYPOTHÈSES DE TRAVAIL 23
APPROCHE ENVISAGÉE 24
LA STRUCTURE DU DOCUMENT 26

LISTE DES FIGURES 28

RÉFÉRENCES 28

PARTIE I : APPLICATION À L'AGROMÉTÉOROLOGIE DU RADAR MÉTÉOROLOGIQUE 33

CHAPITRE 1 : PROBLÉMATIQUE LIÉE A LA TECHNOLOGIE DES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES 34

RÉSUMÉ 34

1. INTRODUCTION 34

2. PRINCIPE DE BASE DE FONCTIONNEMENT DES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES 35

2.1. PRINCIPE DE MESURE DU SIGNAL RADAR 35
2.2. ÉQUATION RADAR 37

3. RADAR MÉTÉOROLOGIQUE DE WIDEUMONT 38

4. LES PRINCIPALES SOURCES D'ERREURS 39

4.1. MESURE DE RÉFLECTIVITÉ 40
4.1.1. Atténuation et amplification *40*
4.1.2. Échos du sol *40*
4.1.3. La propagation anormale *41*
4.1.4. La résolution spatiale *42*
4.2. ESTIMATION DU TAUX DE PRÉCIPITATIONS 42
4.2.1. Profil vertical de réflectivité *42*
4.2.2. Relation Z-R *44*
4.3. CUMUL DE PRÉCIPITATIONS 44

5. CONCLUSIONS 45

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES 46

RÉFÉRENCES 46

CHAPITRE 2 : ESTIMATION DES PRÉCIPITATIONS À L'AIDE DU RADAR MÉTÉOROLOGIQUE DE WIDEUMONT 48

RÉSUMÉ 48

1. INTRODUCTION 48

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES 50

2.1. DONNÉES RADAR 50
2.2. DONNÉES DES STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES 51

2.3. BASE DE DONNÉES 52
2.4. LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES DONNÉES 52

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION 54

3.1. VALIDATION DES CUMULS MENSUELS DE PRÉCIPITATION RADAR 54
3.2. MÉTHODE D'ESTIMATION DE LA PRÉCISION DE LA MESURE RADAR POUR LE SUIVI DE L'OCCURRENCE DES PLUIES 58

4. CONCLUSIONS 63

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES 65

RÉFÉRENCES 65

CHAPITRE 3 : VALIDATION DES ESTIMATIONS DE PRÉCIPITATIONS RADAR POUR DES APPLICATIONS AGROMÉTÉOROLOGIQUES : CAS DU CONTRÔLE DES PÉRIODES D'INFECTION DE Septoria tritici 67

RÉSUMÉ 67

1. INTRODUCTION 68

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES 69

2.1. DONNÉES RADAR 69
2.2. DONNÉES DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES 69
2.3. MODÈLE DE LA SIMULATION DES PÉRIODES D'INFECTION DE LA SEPTORIOSE 70
2.4. DONNÉES D'OBSERVATION DU DÉVELOPPEMENT DE LA SEPTORIOSE 70
2.5. LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES DONNÉES 71

3. RÉSULTATS 71

3.1. APPLICATION ÉPIDÉMIOLOGIQUE DU RADAR DE WIDEUMONT : CAS DE LA SIMULATION DE NOMBRE D'HEURES FAVORABLES À UNE INFECTION 72
3.2. APPLICATION ÉPIDÉMIOLOGIQUE DU RADAR DE WIDEUMONT : CAS DE LA SIMULATION DES PÉRIODES D'INFECTION DE *S. tritici* 74

3. CONCLUSIONS 82

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES 83

RÉFÉRENCES 83

PARTIE II : APPLICATION DU MODÈLE SWEB POUR LE CONTRÔLE DE LA SEPTORIOSE SUR LES FEUILLES DE BLÉ D'HIVER 85

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DE L'HUMECTATION AU NIVEAU DU COUVERT VÉGÉTAL 86

RÉSUMÉ 86

1. INTRODUCTION 86

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL 86
1.2. CAUSES DE L'HUMECTATION A LA SURFACE DU COUVERT VÉGÉTAL 88
1.3. DÉFINITIONS DES VARIABLES UTILISÉES POUR CARACTÉRISER L'HUMECTATION 89
1.4. DISTRIBUTION DE L'EAU À LA SURFACE DU COUVERT VÉGÉTAL 90

2. MÉTHODES ET INSTRUMENTS DE MESURE DE LA DURÉE D'HUMECTATION 90

3. SIMULATION DE LA DURÉE D'HUMECTATION 93

3.1. INTRODUCTION 93
3.2. DÉTERMINATION DE LA DURÉE D'HUMECTATION A DIFFÉRENTES ÉCHELLES 94
3.2.1. A l'échelle de la goutte ("drop scale") 94
3.2.2. A l'échelle d'un organe ("leaf and fruit scale") 95
3.2.3. A l'échelle du couvert ("canopy scale") 95
3.3. PRÉSENTATION DU MODÈLE RETENU 96
3.4. AVANTAGES DU MODÈLE RETENU 98
3.5. APPLICATION DU MODÈLE SWEB DANS D'AUTRES RÉGIONS 98

3.6. INTÉGRATION DU MODÈLE SWEB DANS LES SYSTÈMES DE PRÉVISION DES RISQUES ÉPIDÉMIQUES..... 99

4. LES FACTEURS FAVORISANT L'INFECTION ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA SEPTORIOSE 99

4.1. LA PLUIE 100
4.2. LA TEMPÉRATURE 102
4.3. IMPORTANCE DE L'HUMECTATION 102

5. CONCLUSIONS 104

LISTE DES FIGURES 106

RÉFÉRENCES 106

CHAPITRE 2 : MESURE DE LA DURÉE D'HUMECTATION DANS UN COUVERT DE BLÉ D'HIVER AU MOYEN DE CAPTEURS 112

RÉSUMÉ 112

1. INTRODUCTION 112

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES 113

2.1. CHOIX ET CARACTÉRISTIQUES DES SITES D'ESSAI 113
2.2. TECHNIQUES ET MÉTHODOLOGIE DE MESURE 115
2.2.1. Les capteurs de mesure de la durée d'humectation 117
2.2.1.1. Description 117
2.2.1.2. Peinture des capteurs 118
2.2.1.3. Installation des capteurs 118
2.2.1.4. Maintenance des capteurs 119
2.2.2. Choix des variétés 119
2.2.3. Mesures microclimatiques 120
2.2.3.1. Rayonnement 120
2.2.3.2. Vitesse du vent 120
2.2.3.3. Température sèche et humide 120
2.2.3.4. Humidité relative 120
2.2.4. Méthodologie de détermination de la quantité maximale d'eau retenue par une feuille dans un couvert de blé d'hiver 120

3. RESULTATS 122

3.1. MÉTHODE DE CALIBRATION DES CAPTEURS PAR DES DONNÉES D'OBSERVATION VISUELLES D'HUMECTATION 122
3.2. ANALYSE DES RÉSULTATS DE LA COMPARAISON ENTRE LA MESURE PAR TROIS CAPTEURS ET L'ESTIMATION VISUELLE DE LA DURÉE D'HUMECTATION 124
3.3. DÉTERMINER LA QUANTITÉ D'EAU LIBRE RETENUE PAR LES FEUILLES DE QUATRE VARIÉTÉS DIFFÉRENTES SUR DES PETITES PARCELLES HOMOGÈNES 128

4. CONCLUSIONS 130

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES 131

RÉFÉRENCES 131

CHAPITRE 3 : DÉTERMINATION DE LA DURÉE D'HUMECTATION PAR LE MODÈLE SWEB : SIMULATION VERSUS OBSERVATIONS ET MESURES 133

RÉSUMÉ 133

1. INTRODUCTION 133

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES 135

2.1. LE CHOIX DU SITE D'ESSAI, DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODOLOGIE DE MESURE 135
2.2. SWEB : MODÈLE DE LA SIMULATION DE LA DURÉE D'HUMECTATION 135
2.3. COLLECTE DES DONNÉES D'ENTRÉE : VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES ET LES PARAMÈTRES DU COUVERT 136
2.4. ANALYSE DE SENSIBILITÉ 137
2.4.1. Analyse de sensibilité des principaux paramètres du modèle 138

2.4.2. Sensibilité du modèle aux variables météorologiques d'entrée *138*
2.5. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DE DONNÉES DE SIMULATION PAR LE MODÈLE SWEB 139

3. RÉSULTATS 140

3.1. ANALYSE DE SENSIBILITE DU MODÈLE SWEB 140
3.1.1. Analyse de sensibilité du modèle aux variations des paramètres caractérisant le couvert 140
3.1.2. Sensibilité aux variables météorologiques 142
3.2. APPLICATION DU MODÈLE SWEB : COMPARAISON SIMULATION-OBSERVATION-MESURE 143
3.2.1. Analyse quantitative des données 144
3.2.2. Analyse de l'occurrence des périodes d'humectation [valeurs 0/1] 149

4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS 151

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES 153

RÉFÉRENCES 153

CHAPITRE 4 : ADAPTATION DU MODÈLE SWEB POUR LE CONTRÔLE DES PÉRIODES D'INFECTION DE Septoria tritici 156

RÉSUMÉ 156

1. INTRODUCTION 157

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES 158

2.1. CHOIX DU SITE D'ESSAI, DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODOLOGIE DE MESURE 158
2.2. LE MODÈLE DE SIMULATION DES PÉRIODES D'INFECTION DE *S. tritici* PROCULTURE 159
2.3. LE MODÈLE DE LA SIMULATION DE LA DURÉE D'HUMECTATION SWEB 160
2.4. LES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES 160
2.5. ANALYSE STATISTIQUE 161

3. RESULTATS 161

3.1. COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES DE SIMULATION DE PROCULTURE ET L'ESTIMATION VISUELLE DE DÉVELOPPEMENT DE *S. tritici* 162
3.2. RELATION ENTRE LES PÉRIODES D'HUMECTATION SIMULÉES PAR SWEB ET LES INFECTIONS DE *S. tritici* SIMULÉES PAR PROCULTURE 167

4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS 170

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES 174

RÉFÉRENCES 174

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES 176

APPORT DE L'ÉTUDE 178

CONTEXTE GÉNÉRALE ET CADRE DE L'ÉTUDE 178
VALIDITE DE L'ÉTUDE ET LIMITES DES RÉSULTATS 179
SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR L'APPLICATION AGROMÉTÉOROLOGIQUE DU RADAR MÉTÉOROLOGIQUE 180
- La problématique liée à la technologie radar 180
- Validation des cumuls mensuels de précipitations radar 181
- Validation des occurrences horaires de précipitations radar 182
- L'impact des estimations radar sur la détermination des périodes d'infection de la septoriose 182
SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ADAPTATION DU MODÈLE SWEB POUR LE CONTRÔLE DES PÉRIODES D'INFECTION DE *S. tritici* 183
- La mesure de la durée d'humectation par les capteurs 183
- La simulation de la durée d'humectation par le modèle SWEB 184
- Évaluation du modèle SWEB pour le contrôle des périodes d'infections de la septoriose 185

DISCUSSION GÉNÉRALE 186

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 193

RÉFÉRENCES 198

ANNEXES 201

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier toutes les personnes rencontrées au cours de ce travail ayant eu une implication directe ou indirecte.

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisée dans le Département Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège Campus d'Arlon et en partie à l'Institut Royal Météorologique de Belgique. Je tiens à remercier ces deux instituts et toutes les personnes qui ont permis à cette étude d'aboutir en facilitant une coopération dont j'ai apprécié l'intérêt.

Ce travail n'aurait pas pu être réalisé sans la confiance totale que m'a accordée le Dr. Bernard Tychon. Je tiens à lui exprimer vivement mes remerciements pour m'avoir accueilli et encadré tout au long de ma thèse, ainsi que pour m'avoir fourni les encouragements et la liberté dont j'avais besoin pour effectuer mon travail.

Mes remerciements s'adressent ensuite à Dr. Moussa El Jarroudi pour avoir co-dirigé et soutenu mon travail. Je le remercie aussi pour m'avoir fait profiter de son expérience et de ses conseils, tant au niveau pratique que théorique du début à la fin de ce travail.

Mes pensées iront ensuite vers le Pr. Lucien Hoffmann, qui a rendu possible ce travail en y collaborant activement. Qu'il soit ici remercié pour ses encouragements, ses conseils, pour le soutien constant et important qu'il m'a généreusement donné durant l'ensemble de ce travail et pour son enthousiasme qui a stimulé ma motivation.

Je suis également très reconnaissant envers Dr. Rober Oger pour m'avoir donné de son temps et fourni de précieux conseils emprunts de sa longue expérience sur le sujet de recherche. Je le remercie plus particulièrement de m'avoir aidé à structurer mon travail. Merci également pour ses encouragements, son enthousiasme et les déplacements qu'il a effectués jusqu'à Arlon.

Je remercie le Dr. Laurent Delobbe, responsable scientifique du radar météorologique à l'Institut Royal Météorologique de Belgique, pour son aide constant dans la réalisation de ce document et pour m'avoir accordé une grande partie de son temps ainsi que pour m'avoir fourni les encouragements dont j'avais besoin pour commencer mon travail.

Je suis également très reconnaissant envers Dr. Laurent Huber (INRA - Avignon) pour m'avoir guidé et enrichi des remarques pertinentes et pour m'avoir donné de son temps et fourni de précieux conseils. Je le remercie plus particulièrement de m'avoir aidé à structurer mon travail à un moment où j'en avais besoin.

Je souhaite aussi remercier Pr. Michel Erpicum et Dr. Moussa El Jarroudi et Dr. Laurent Delobbe (IRM-Bruxelles) d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Ce travail n'aurait pas pu être réalisé sans la contribution financière du Ministère de la Culture, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche du G-D de Luxembourg. Je suis très reconnaissant de l'appui enthousiaste qu'il a sans cesse apporté à ce travail.

Ma gratitude va également à de nombreux personnels de l'IRM qui ont contribué à ce travail. Je tiens à remercier tout particulièrement : Monsieur Dirk De Muer, chef de département observations, pour m'avoir accueilli au sein de son département et pour m'avoir accepté d'effectuer un stage au sein de son équipe; Monsieur Christian Tricot, chef de section renseignements climatologiques, qui m'a permis de réaliser cette étude et dont les conseils et les critiques furent précieux ; ainsi que Monsieur Christophe Ferauge, Monsieur Geert Desadelaer, Monsieur Dedier Dehem, Monsieur Stephane Dekeyzer pour la gentillesse avec laquelle ils m'ont proposé leur aide, pour la disponibilité dont ils ont fait preuve pour commencer mon travail. Il me serait impossible d'oublier les marques de sympathie du reste de tous les membres de l'Institut Royal Météorologique. Que chacun d'entre eux puisse trouver entre ces lignes un souvenir amical et sincère.

Je remercie également Philippe Dierickx, ingénieur au Ministère de l'Equipement et des Transports de la Région Wallonne pour avoir mis à ma disposition les données météorologiques nécessaires à la réalisation d'une partie de cette étude.

Je remercie toute l'équipe du Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann composée de Philippe Delfosse, Laurent Pfister, Christian Wagner. La collaboration menée avec eux sur le terrain a été fructueuse et fut un réel plaisir.

Je tiens aussi à remercier l'Institut National de recherches Agronomiques des Services Techniques de l'Agriculture (INRA Paris-Grignon) particulièrement Dominique Flura, Ingénieur d'Etude INRA, pour son aide matérielle et surtout pour la configuration des acquisiteurs de données.

Mes remerciements vont également à la direction et au personnel du Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück et de la Chambre d'Agriculture luxembourgeoise. Plus particulièrement, je remercie Guy Reiland, Marc, Simone Marx et Nico Godart.

Je n'oublie pas aussi l'ensemble des membres de l'équipe Eau et Environnement qui m'ont aidé chacun à leur façon et avec qui j'ai passé de bons moments. Merci à Djaby Bakari, Farid Traoré, Christophe Mackels, Antoine Denis, Mohammed Bouezmarni, Djeneba Manu, Louis Amani, Virginie Schyns, Souleymane Touré, Marie Corse, Florence de Longueville, Riad Balagui, Yvon Hountondji, Bertrand Martin et Hamid Mahyou pour le bon temps passé ensemble.

Merci aussi à Catherine Hyrman, Farid Traoré, Marie-Claire Bilocq et Hosein El Ouarghi pour leurs précieuses corrections.

Forte dédicace aussi à mes chers amis pour tout ce bon temps passé ensemble : Abdelmonaim, Bouafa, Hicham, Fouad, Manu, Rachid, Samira, Saïd.

Enfin, de chaleureux remerciements vont à ma femme, compagne de chaque jour qui a cru en moi, ma fille Israa, source de joie au quotidien et à mes parents pour leur indéfinissable soutien. Un grand merci à mes frères, mes sœurs, mes nièces, mes neveux qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments de découragement.

RÉSUMÉ

L'humectation *des surfaces végétales, due principalement aux précipitations sous forme de* ***pluie*** *ou de* ***rosée****, joue un rôle déterminant lors de la phase de contamination des plantes par de nombreux* ***agents phytopathogènes****. La connaissance de la pluie et de la rosée constitue un élément fondamental pour l'étude et la compréhension du fonctionnement des modèles de simulation des épidémies et des* ***systèmes d'avertissements*** *agricoles. L'objectif de cette recherche est de contribuer à l'amélioration du système d'avertissement des principales* ***maladies cryptogamiques*** *affectant le* ***blé d'hiver*** *au sud de Belgique et au G-D de Luxembourg.*

Notre démarche a consisté, dans un premier temps à évaluer les potentialités du ***radar météorologique*** *de Wideumont. Nous avons décrit son fonctionnement général ainsi que son principe de mesure et nous avons détaillé les différentes sources d'erreur qui affectent les estimations de précipitations dérivées des observations radar. Les mesures radar sont moins précises que les mesures de précipitations par des pluviomètres. Néanmoins, le radar permet d'observer en temps réel les précipitations sur un large domaine avec une très bonne résolution spatiale et temporelle. La comparaison quantitative et qualitative des précipitations mesurées au sol avec celles estimées par le radar a été faite sur une période de trois ans (2003, 2004 et 2005). Les résultats de la validation des cumuls mensuels font apparaître que le radar a tendance à sous-estimer les précipitations. L'erreur calculée pour l'ensemble des stations varie entre -50% et +12%. La validation qualitative du radar a été réalisée sur des occurrences de cumuls horaires. Les indices calculés à partir des tables de contingence donnent des valeurs de POD (Probability Of Detection) entre 0.44 et 0.80 durant la période étudiée.*

L'impact des estimations radar sur les périodes d'infection de ***Septoria tritici*** *simulées par* ***PROCULTURE*** *a été évalué durant trois saisons culturales (2003, 2004 et 2005) par comparaison entre les données de sortie du modèle (alimenté par des estimations radar de précipitations horaires) et les estimations visuelles du développement des symptômes de la maladie sur les trois dernières feuilles. Les outputs de PROCULTURE via les données radar ont montré un grand accord entre la simulation et l'observation. Le radar météorologique devrait dès lors être bénéfique pour des régions où le réseau des pluviomètres est inexistant (ou moins dense) et où l'incidence de la septoriose est importante.*

Dans un deuxième temps, sur base d'une recherche bibliographique, un modèle d'humectation a été choisi. Le modèle sélectionné, appelé SWEB, se base sur le bilan énergétique et le bilan hydrique. Il simule la durée d'humectation due à la pluie et à la rosée sur l'ensemble du ***couvert végétal*** *à partir des données issues des stations agrométéorologiques. Le modèle a été ensuite testé et validé sur différentes variétés de blé d'hiver. Les données de sortie du modèle ont été comparées statistiquement aux mesures des capteurs (préalablement calibrés) et aux données d'observation obtenues sur des parcelles expérimentales et au champ durant les saisons culturales 2006 et 2007. Sur base des résultats obtenus, le modèle SWEB semble sous-estimer la durée d'humectation et plus particulièrement pour les événements de la fin d'humectation (dryoff). L'erreur moyenne en général est inférieure à 90 minutes.*

Dans un troisième temps, afin d'obtenir une relation entre les périodes d'humectation et le développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles, les périodes d'humectation simulées par SWEB ont été comparées d'une part aux périodes d'infection de Septoria tritici simulées par PROCULTURE et d'autre part aux estimations visuelles. Le modèle de la durée d'humectation simule avec succès des périodes d'humectations, dues à la fois à la rosée et à la pluie, qui ont déclenché l'infection de la septoriose observée sur des parcelles expérimentales. Une durée minimale d'humectation favorable à l'infection des feuilles de blé par Septoria tritici a été déterminée.

Il est donc désormais nécessaire d'élaborer un système opérationnel intégrant le radar météorologique, le modèle de la durée d'humectation et le modèle épidémiologique. Notre travail a permis d'acquérir via l'analyse des données agrométéorologiques et des données phytopathologiques, les connaissances nécessaires à l'élaboration d'un tel système et de participer ainsi à l'amélioration des modèles d'avertissements existants. En effet, nous avons analysé les avantages et les limites du système radar comme données d'entrée aux modèles et son aptitude dans la spatialisation des données. Nous avons également testé le modèle d'humectation pour la détermination des périodes d'infection nécessaires au développement de la septoriose.

Dans une perspective d'une meilleure opérationnalisation du système, l'approche envisagée pourrait facilement être intégrée dans le système existant pour la simulation d'autres maladies comme les rouilles, l'oïdium et la fusariose à l'échelle régionale.

En définitive, ce travail aura prouvé une fois de plus l'intérêt du "mariage" entre l'agrométéorologie et la phytopathologie.

Mots-clés : *Radar météorologique, Durée d'humectation, Blé d'hiver, Septoria tritici, Système d'avertissement, Spatialisation.*

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Contexte général
Épidémiologie de la culture du blé d'hiver au G-D de Luxembourg
Impact de l'humectation sur la protection des plantes
Application du radar météorologique dans la prévision des risques épidémiques
Problématique et approche envisagée
Positionnement de notre travail dans le cadre de prévision épidémique
Objectifs de la recherche
Priorité dans le cadre de la thèse
Hypothèses de travail
Approche envisagée
Structure du document

RÉFÉRENCES

CONTEXTE GÉNÉRAL

Les changements climatiques, l'accroissement démographique, l'augmentation de la productivité agricole (Seelan et al., 2003) et l'augmentation de stress causés par le complexe parasitaire (Oerke, 2006; Vitousek et al., 1996) sont parmi les grands défis de la politique agricole et environnementale de l'Union Européenne. Par exemple, les pertes potentielles dues à des agents parasitaires nuisibles sont estimées à 50% pour la culture de blé dans le monde (Oerke, 2006).

Dans les pays de l'Union Européenne, les principaux objectifs de cette politique agricole et environnementale sont d'apporter[1] :

- des réponses aux impératifs de la sécurité alimentaire, de l'emploi et de la stabilité ;
- d'assurer la sécurité de l'approvisionnement agricole du pays ;
- de garantir des prix raisonnables pour les produits proposés aux consommateurs ;
- d'accroître la productivité de l'agriculture tout en préservant l'environnement.

Les céréales et leurs produits dérivés constituent la principale source d'alimentation dans beaucoup de régions du monde. Les statistiques indiquent qu'en 2008, la récolte des céréales dans les pays de l'Union Européenne a été au-dessus de la moyenne (301 M tonnes soit 43 M tonnes au-dessus de la moyenne)[2]. Parmi les raisons principales de cette augmentation du rendement on trouve les conditions météorologiques favorables et l'utilisation des méthodes permettant de minimiser les pertes dues aux parasites des cultures. L'utilisation des fongicides pour lutter contre les maladies cryptogamiques est fort concentrée dans les pays de l'Union Européenne. Cette utilisation représentait en 1998, 85% des produits utilisés à l'échelle mondiale (Verreet et al., 2000). L'occurrence de chaque agent pathogène et l'importance économique des maladies qu'il engendre varient substantiellement selon les différentes régions climatiques et selon les conditions phytotechniques de chaque exploitation agricole. Le développement des épidémies est dépendant des conditions climatiques, pédologiques et phytotechniques de chaque région. En conséquence, à côté des pratiques agricoles (variétés, fumures azotées, date de semis, précédent cultural, densité de semis…), l'environnement climatique gouverne les différentes phases du cycle épidémique (le moment de l'attaque, le développement et la sévérité du complexe maladie-plante-hôte, …). Les facteurs climatiques

[1] http://euramis.net/pol/agr/index_fr.htm.
[2] http://ec.europa.eu/luxembourg/news/frontpage_news/345_fr.htm

tels que la température, la pluie et l'humidité relative, sont d'une importance capitale en épidémiologie (Rapilly, 1991).

Désormais, les objectifs passent de "produire" plus à "produire plus propre" (Ciancio et Mukerji, 2007) afin de promouvoir une agriculture durable (Delos et al., 2002). Au G-D de Luxembourg, un des enjeux majeurs actuels de l'agriculture est de concilier rentabilité avec qualité des produits et préservation de l'environnement. Il devient donc urgent de développer des stratégies plus raisonnables et plus respectueuses de l'environnement qui permettent de guider l'agriculteur pour une meilleure gestion des exploitations agricoles. L'optimisation des interventions fongicides n'est possible que par des études pluridisciplinaires qui permettent de quantifier la part propre à chaque intervention dans le risque épidémique. La modélisation et la simulation prévisionnelle peuvent permettre cette réduction des charges fongicides.

La bibliographie des trente dernières années fait état de nombreux travaux sur l'épidémiologie et la simulation appliquée à la protection des plantes (Ciancio et Mukerji, 2007). L'avancement des progrès technologiques, tels que l'utilisation des outils de télédétection, des modèles numériques, des systèmes d'information géographique, pourrait être capable de fournir de nouvelles informations pour la lutte intégrée et la protection des plantes (Dutcher, 2007; Forrest et Nutter, 2007; Maggi et Qinghua, 2007). Ces outils devraient permettre une mesure plus performante des variables qui gouvernent le développement des épidémies des plantes (Cooke, 2007; Magarey et Sutton, 2007). Les recherches sur l'utilisation des modèles agrométéorologiques et particulièrement sur l'estimation de la durée d'humectation par exemple, et sur de nouveaux instruments météorologiques, tels que les réseaux de stations pluviométriques automatiques et plus encore le radar météorologique sont actuellement en plein essor (Gillespie et Sentelhas, 2008; Henze et al., 2007; Rowlandson et al., 2004; Rowlandson et al., 2009; Verreet et al., 2000). Ces outils devraient permettre une mesure plus fidèle des variables agrométéorologiques. Notre contribution à cette problématique se traduira essentiellement par la détermination de la durée d'humectation des feuilles de blé en relation avec le développement de la septoriose, ce que nous appelons "durée d'humectation épidémiologique". Cette dernière se définit comme une durée d'humectation minimale pour rendre possible l'infection par un pathogène. Notre recherche tente de cerner les conditions d'humectation favorisant les infections. Le but sera ensuite de mettre en place un outil d'aide à la décision qui tiendra compte des nouvelles connaissances acquises sur cette durée d'humectation épidémiologique.

Au cours du siècle dernier, l'utilisation des connaissances scientifiques et du développement de nouvelles technologies dans les pratiques agricoles était très médiocre partout en Europe (Maracchi, 2006). Parmi les raisons principales de cette situation nous citons les arguments suivants :

- les modèles prévisionnels étaient moins précis en termes d'information que les règles empiriques adoptées par les agriculteurs ;
- la diffusion de l'information n'était pas suffisamment rapide pour aider l'agriculteur à prendre une décision à temps.

Actuellement, les méthodes de diffusion sont très développées et permettent d'avertir les agriculteurs dès que les seuils de nuisibilité économique et environnemental sont atteints (Anonymous., 2006).

Au cours des dernières décennies, des changements importants découlant de la révolution numérique, ont été expertisés sur les pratiques des agriculteurs. Ces derniers reçoivent via des bulletins d'avertissements, l'évolution des agents nuisibles propres à chaque région céréalière ainsi que des conseils sur les moments propices pour procéder aux traitements fongicides. Dans cette optique, le G-D de Luxembourg promeut les méthodes qui visent à moduler le nombre d'applications fongicides en fonction de la pression parasitaire. Cette stratégie peut s'avérer à la fois économiquement intéressante et respectueuse de l'environnement.

On trouvera dans ce volet introductif, un bref exposé bibliographique de l'évolution des connaissances sur l'influence des conditions climatiques ainsi que sur l'épidémiologie des principaux agents affectant la culture du blé d'hiver. Dans le volet "épidémiologie", le principal point qui sera abordé est la modélisation de la durée d'humectation et les systèmes de lutte contre les maladies des plantes. Ensuite, nous donnerons un aperçu de l'intérêt de l'utilisation de l'agrométéorologie dans la lutte intégrée et plus particulièrement de l'information radar pour la prévision des risques épidémiques. Enfin, nous aborderons la problématique ainsi que la structure de notre travail.

ÉPIDÉMIOLOGIE DE LA CULTURE DU BLÉ D'HIVER AU G-D DE LUXEMBOURG

Au G-D de Luxembourg, la culture du froment d'hiver constitue la principale occupation des exploitations céréalières (STATEC, 2007). Elle représentait, en 2006, 41% des céréalicultures (9.27% de la surface agricole utilisée et 20.02% de la surface de terre arable). La culture du

blé d'hiver est à la fois la plus représentée en grandes cultures et la plus exposée aux infections de toute nature. Parmi les principaux agents cryptogamiques du blé d'hiver rencontrés citons : la septoriose des feuilles causée par la forme conidienne *Septoria tritici* [ROBBINS & DESMAZIÈRES] téléomorphe *Mycosphaerella graminicola* [FUCKEL, SCHROETER], la rouille jaune causée par *Puccinia striformis* et la rouille brune causée par *Puccinia triticina.* On trouve également d'autres maladies d'importance variable comme les fusarioses, l'oïdium, les piétins-verses et l'helminthosporiose.

La septoriose des feuilles du blé d'hiver est la maladie la plus préoccupante de ce type de plante dans les pays européens et dans le monde (Brown et al., 2001; Eyal, 1999; Eyal et al., 1985; Hunter et al., 1999; Shaner et Finney, 1976) et précisément la principale maladie foliaire affectant la culture du blé d'hiver au G-D de Luxembourg (El Jarroudi et al., 2002). Cette maladie, est aujourd'hui la plus fréquente et la plus importante sur le plan économique. En effet, elle peut causer des pertes de rendement significatives allant de 20 à 30 % (El Jarroudi, 2005) lorsque les trois dernières feuilles sont sévèrement attaquées (King et al., 1983; Shaw et Royle, 1989; Thomas et al., 1989). Au cours de ces dernières années et particulièrement en 2002 elle a pris une extension considérable dans la plupart des régions céréalières au G-D de Luxembourg. Les attaques de rouilles varient selon les années et selon les variétés (El Jarroudi et al., 2004). Les attaques d'autres maladies sont moins fréquentes.

L'extension de la septoriose est fortement dépendante des conditions météorologiques locales et de l'effet variétal. Bien que la relation entre les conditions environnementales et le développement de la septoriose soit avérée (Eyal et al., 1985; Henze et al., 2007; Hess et Shaner, 1987a, b; Magboul et al., 1992; Shaw, 1990), l'information concernant l'interaction entre les facteurs favorisant le développement du pathogène est peu claire, en particulier les conditions minimales d'infection. Une première étape de ce travail consiste à faire une synthèse bibliographique des différents travaux de recherches réalisés sur les facteurs influençant le développement de l'épidémie de la septoriose.

À l'heure actuelle, le G-D de Luxembourg dispose d'un système d'avertissement pour lutter contre les maladies cryptogamiques du blé d'hiver. Le système a été mis en place par la contribution de différents acteurs et centres de recherches (Unité de phytopathologie de l'Université Catholique de Louvain, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège, ASTA et Département Environnement et Agro-biotechnologies (EVA) du Centre de Recherche Public-Gabriel Lippmann (CRP-GL). Une grande synergie a

été déployée entre les différentes équipes qui participent à l'élaboration de ce projet pour rendre plus opérationnelle l'émission des bulletins d'avertissement et la collecte des données scientifiques sur l'épidémiologie des maladies cryptogamiques du blé d'hiver. L'élaboration de ce système d'avertissement s'insère dans le cadre du projet SINTAMA[3] (2003-2006) et du projet MACRY[4] (2006-2009) financés par l'ASTA et coordonnés par le Département EVA du CRP-GL. Depuis 2004, ces bulletins d'avertissements destinés aux céréaliers luxembourgeois ont été publiés sur la page Web de la Chambre d'Agriculture Luxembourgeoise et dans le journal agricole luxembourgeois "De Letzeburger Bauer". Les bulletins donnent hebdomadairement l'état d'avancement de la maladie et conseillent les agriculteurs quant au moment adéquat du traitement fongicide de leur culture.

Actuellement ce système d'avertissement se base sur le modèle prévisionnel PROCULTURE développé par l'Unité de Phytopathologie de l'UCL (Moreau et Maraite, 1999, 2000). Ce système se démarque des autres systèmes d'avertissements classiques par sa prise en compte d'un module de croissance des feuilles et la date d'apparition des symptômes sur ces feuilles. Il simule la croissance des cinq dernières feuilles. Le modèle a été validé pour la culture du blé tendre d'hiver sur une période de trois ans en Belgique (Moreau et Maraite, 1999), et sur une période de plus de cinq ans au G-D de Luxembourg (El Jarroudi et al., 2009). Le modèle continue d'être amélioré dans le cadre du projet MACRY (2006-2009) et du projet SENTINELLE (2009-2012). Il permet de donner des avertissements concernant l'application de produits phytosanitaires par un suivi et une prévision du développement de la septoriose au cours de la saison de culture. Le taux de succès de PROCULTURE en terme d'occurrence d'infection est de 85% (El Jarroudi et al., 2009). Cependant, le phénomène de résistance de souches aux fongicides et la présence simultanée de la forme conidienne *Septoria tritici* et la forme sexuée *Mycosphaerella graminicola* pendant la saison incitent à la réflexion sur l'amélioration des modèles d'avertissement. C'est dans ce contexte que notre travail se situe. Il a pour objectif principal de participer à l'amélioration continue de ce système d'avertissement.

[3] Conception et élaboration d'un système intégré d'avertissement des maladies cryptogamiques du blé d'hiver au G.D. de Luxembourg. Projet coordonné par Dr. B. Tychon (Département en Sciences et Gestion de l'Environnement) et Pr. L. Hoffmann (Centre de Recherche Public-Gabriel Lippmann au Luxembourg).

[4] Elaboration d'un système intégré d'avertissement des différentes maladies cryptogamiques du blé au Grand-Duché de Luxembourg. Projet coordonné par Dr. B. Tychon (Département en Sciences et Gestion de l'Environnement) et Pr. L. Hoffmann (Centre de Recherche Public-Gabriel Lippmann au Luxembourg).

Le cycle de *Septoria tritici (Mycosphaerella graminicola*) responsable de la septoriose du blé d'hiver (Figure 1)

Septoria tritici (stade conidienne) appartient aux Ascomycètes. *Mycosphaerella graminicola* (stade sexué) est la forme sexuée de *S. tritici*. Ce champignon nécrotrophe présente deux formes de reproduction qui génèrent deux types de cycles infectieux permettant le développement de la maladie.

Les ascospores produites par la forme sexuée sont libérées à l'automne par la pluie et dispersées par le vent dans l'air, ce qui expliquerait une répartition homogène des symptômes observés dès la fin de l'automne et pendant l'hiver sur les cultures de blé (Lovell et al., 2002; Thomas et al., 1989).

S. tritici ne peut jouer le rôle d'inoculum primaire qu'à partir de pycnidiospores présents sur les débris de culture. Ceux-ci sont lourds et ne peuvent être disséminés que par les gouttes de pluie sur quelques décimètres. Une infection primaire par *S. tritici* n'est donc possible que sur la culture d'un deuxième blé ou sur une succession de céréales sensibles. On peut observer les pycnides de *S. tritici* dès l'automne et pendant tout l'hiver, ce qui suggère l'accomplissement de premiers cycles asexués dès l'apparition des premières feuilles. Au printemps**,** les pycnidiospores sont formés dans les pycnides édifiés dans les parties nécrosées des feuilles. Avec l'humidité ambiante, les pycnides se resserrent et les spores sont expulsées au sein d'une gelée (cirrhe). Ces cirrhes sont alors projetés vers les étages foliaires supérieurs par les éclaboussures créées par les gouttes de pluie.

Les spores disséminées germent et un tube germinatif pénètre au sein de la feuille par les stomates. S'ensuit une période de latence pendant laquelle le mycélium de *S. tritici* progresse au sein des espaces intercellulaires du mésophylle. Après 15 à 20 jours, la croissance du mycélium s'amplifie et détruit les parois des cellules. Les symptômes apparaissent et des pycnides se forment au niveau des stomates.

Le déroulement des cycles successifs menant à l'infection des étages foliaires supérieurs dépend des conditions d'humidité et de température. Pour germer, les spores ont besoin d'eau libre sur les feuilles. Au G-D de Luxembourg, depuis 2002 au moins, cette maladie est présente chaque année bien avant la floraison (El Jarroudi, 2005).

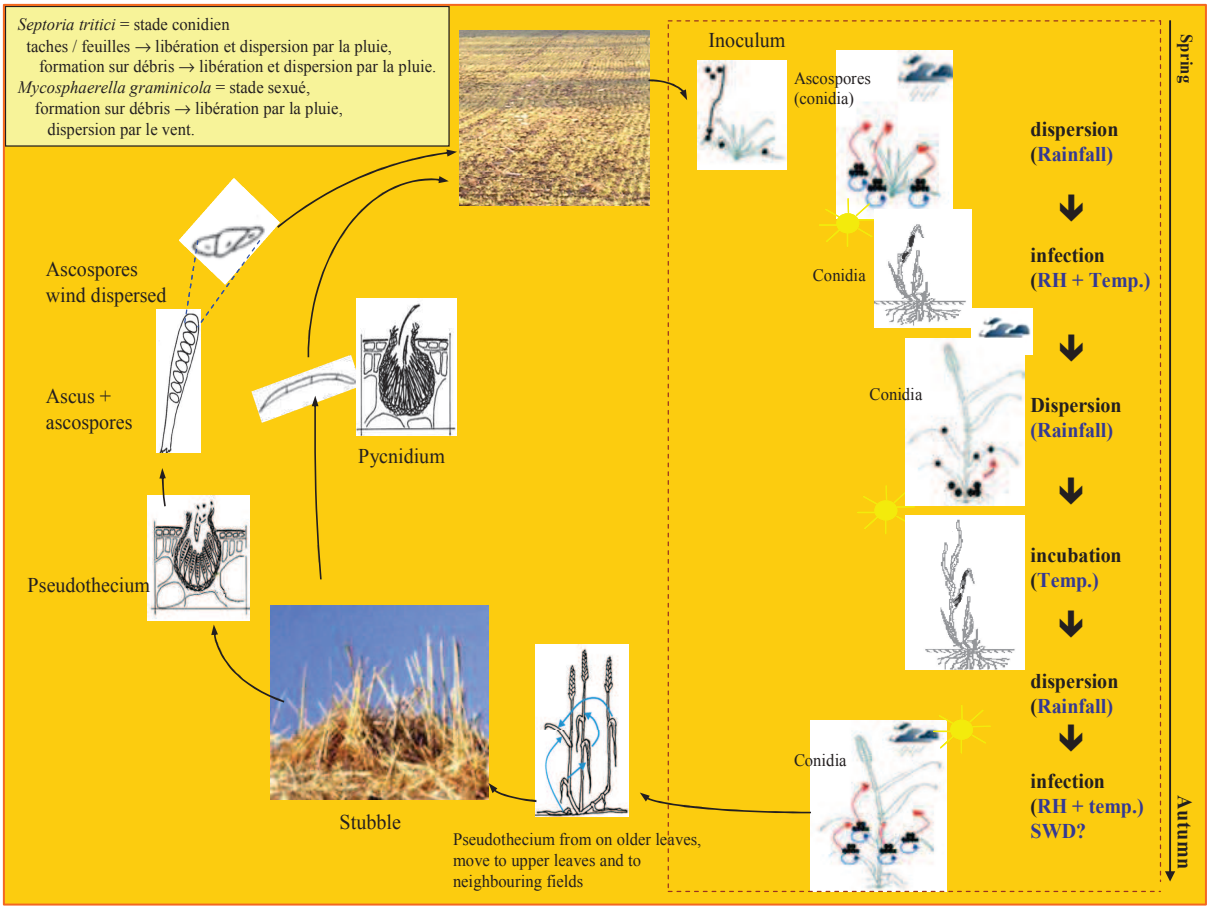


Figure 1. Cycle de vie de *Septoria tritici (Mycosphaerella graminicola*) responsable de la septoriose du blé d'hiver (Doyle, 2004).
Life cycle of Septoria tritici (Mycosphaerella graminicola) causing Septoria tritici blotch of winter wheat (Doyle, 2004).

IMPACT DE L'HUMECTATION SUR LA PROTECTION DES PLANTES

L'humectation des feuilles et plus particulièrement la durée d'humectation est une variable agrométéorologique importante (Cooke, 2007; Huber et Gillespie, 1992; Seem et al., 2000; Yarwood, 1978). Au même titre que la température, ce paramètre joue un rôle déterminant dans la prévision des risques épidémiques et dans la protection des récoltes (Campbell et Madden, 1990; Huber et Gillespie, 1992; Lhomme et Jimenez, 1992; Magarey et Sutton, 2007; Papastamati et al., 2004; Waggoner et al., 1980). Ce facteur prépondérant est indispensable à la multiplication des cycles de vie de la plupart des maladies cryptogamiques du blé d'hiver telles que la septoriose des feuilles causée par *S. tritici,* la rouille jaune (*P. striformis*) et la rouille brune (*P. triticina*). Le succès de l'infection dépend étroitement de la température et de la durée d'humectation. En effet, la présence d'eau libre sur les organes végétaux permet le développement et la germination des spores et leur pénétration dans les

tissus hôtes (Gleason et al., 1994; Kim et al., 2002; Lhomme et Jimenez, 1992; Papastamati et al., 2004; Pedro, 1980).

La difficulté principale de l'utilisation de la durée d'humectation est que la mesure de cette variable n'est pas prise en compte dans l'ensemble des observations instrumentales effectuées par les stations des réseaux agrométéorologiques (Huber, 1992; Sabatini et al., 2005) et ceci pour plusieurs raisons :

- Aucune norme pour cette mesure n'a été largement acceptée.
- La plupart des capteurs fournissent une mesure indirecte de la durée d'humectation et leur bilan d'énergie est par essence différent de celui d'une feuille partiellement recouverte par une population de gouttelettes ou par un film d'eau (Magarey et al., 2005).
- Les capteurs d'humectation sont peu représentatifs de la variabilité spatiale importante existant au niveau du couvert végétal (Dalla Marta et al., 2005b; Dalla Marta et al., 2008; Lulu et al., 2008a, b; Sentelhas et al., 2005) et ils nécessitent une calibration pour chaque culture (Getz, 1992; Giesler et al., 1996; Lomas et Shashoua, 1970).
- La position d'un capteur dans le couvert est toujours problématique du fait que la durée d'humectation varie avec l'architecture et le stade de développement de la culture, de même qu'avec la position, l'angle, la forme des feuilles (Lau et al., 2000). La conception d'un capteur devrait représenter le plus exactement les conditions de la position et de l'exposition ainsi que les propriétés physiques des feuilles (Sentelhas et al., 2004; Weiss et Lukens, 1981).
- La maintenance des capteurs est souvent délicate et nécessite une installation dans chaque exploitation agricole (Chtioui et al., 1999).

En raison de toutes les difficultés liées à la mesure de l'humectation, l'utilisation des modèles de simulation de la durée d'humectation due à une pluie (Butler, 1986; Huber, 1988) ou à un dépôt de rosée (Pedro et Gillespie, 1982; Weihong et Goudriaan, 1991) ou à la fois à la rosée et à la pluie (Hoppmann et Wittich, 1997; Magarey, 1999) est devenue une alternative évidente aux mesures (Huber, 1992; Huber et Gillespie, 1992; Magarey et al., 2005). Des efforts de recherche demeurent nécessaires pour améliorer la modélisation et la prévision à court terme de la durée d'humectation, ainsi que le développement de méthodes de mesures

relatives à d'autres variables comme par exemple le flux de condensation et d'évaporation de rosée (Magarey et al., 2005).

L'infection par le complexe parasitaire et les variables agrométéorologiques, notamment la durée d'humectation, peuvent être reliées en utilisant des modèles de simulation qui fournissent des informations utiles pour l'amélioration du calendrier de traitement. Les recherches pour l'évaluation de l'importance de la durée d'humectation ont commencé dès les années quarante (Penman, 1948). Huber et Gillespie, (1992) ont cité au moins 16 modèles de simulation pour la détermination de la durée d'humectation. Depuis, d'autres modèles ont été développés. Il existe des modèles empiriques qui visent à simuler la durée d'humectation par des méthodes statistiques (Dalla Marta et al., 2005a; Gleason et al., 1994; Kim et al., 2002; Kim et al., 2005; Rao et al., 1998). Et des modèles physiques, qui tentent de décrire conceptuellement les relations entre les facteurs responsables de l'humectation et son expression (Bass et al., 1991; Luo et Goudriaan, 2000; Papastamati et al., 2004; Pedro, 1980).

La recherche bibliographique a permis d'estimer que l'effet du climat sur les épidémies de la septoriose a déjà été largement étudié (Gladders et al., 2001; Hess et Shaner, 1987a, b; Shaner et Buechley, 1995; Shaner et Finney, 1976; Shaw, 1990; Shaw, 1991; Shaw et Royle, 1993). En revanche, les effets des périodes d'humectation en terme de durée minimale nécessaire à l'infection sur le développement de la maladie n'avaient pas été suffisamment explorés (Chungu et al., 2001). En outre, selon Yuen et Hughes (Yuen et Hughes, 2002), la densité du couvert végétal influence également le développement de certaines maladies. Cependant, la relation entre la densité du couvert végétal et la durée d'humectation n'a pas encore été déterminée.

Des études en conditions contrôlées ont permis de définir la durée d'humectation, continue ou interrompue, nécessaire à l'établissement de l'infection, ceci en relation avec la température de l'air ou de la feuille (De Vallavieille-Pope et al., 1995). Cependant la très forte variabilité spatio-temporelle de l'humectation et ses conséquences éventuelles sur le développement des épidémies via la réussite ou l'échec de l'infection, sont restées largement inexplorées.
L'humectation des feuilles est une variable dont la spatialisation est difficile à estimer. Ce problème devient plus important encore lorsque l'humectation des feuilles est due principalement à la pluie (Cicogna et al., 2005). En effet, les précipitations convectives sont, en général, irrégulièrement distribuées (d'où la nécessité d'un réseau météorologique très dense).

Comme évoquée ci-dessus, la mesure ponctuelle de la durée d'humectation à l'aide d'un capteur ne peut pas présenter la variabilité spatiale (importante) existant au niveau du couvert végétal (Dalla Marta et al., 2008; Lulu et al., 2008b; Sentelhas et al., 2005). L'utilisation d'un modèle de simulation permet la détermination de la durée d'humectation là où les données météorologiques sont disponibles. Si une grille météorologique est disponible (température, humidité relative, rayonnement…), cela signifie que la détermination de la durée d'humectation pourra être simulée sur tout un territoire. Cependant, il faut que l'interpolation spatiale qui a créé ces grilles soit performante, ce qui n'est pas toujours le cas (Rowlandson et al., 2004; Workneh et al., 2005; Workneh et al., 2004). Les simulations de la durée d'humectation permettent la production d'avertissements et de conseils et peuvent constituer un outil important pour la planification des activités de terrain (Dalla Marta et al., 2007; Gleason et al., 2008; Lulu et al., 2008b; Royer et al., 1989). L'utilisation de nouvelles technologies, telles que le radar météorologique et système d'information géographique pourrait fournir des informations qui permettraient une meilleure exploitation des données météorologiques. De telles approches fourniront, à terme, des outils supplémentaires pour la spatialisation de la prévision de la durée d'humectation dans le cadre de la rationalisation de la protection des plantes.

Au G-D de Luxembourg la présence d'eau libre à la surface des feuilles dans une gamme de températures optimales pendant une durée minimale est un facteur clé pour la contamination des feuilles par la septoriose, les rouilles, l'oïdium. Ce facteur caractérisé par la durée d'humectation est, jusqu'à présent, mal connu. En outre, dans l'état actuel de la pratique agricole, il apparaît que la durée d'humectation n'est pas utilisée (comme variable météorologique) dans les modèles de prévision de la lutte contre les maladies fongiques, du fait surtout de l'absence d'information sur la manière d'utiliser cette variable. Une des principales tâches de notre travail est d'approfondir ce point. Cette information sera intégrée dans le système d'avertissement pour optimiser l'application des fongicides sur les plantes et agir tant sur les coûts que sur l'impact environnemental engendrés de ces produits.

APPLICATION DU RADAR MÉTÉOROLOGIQUE DANS LA PRÉVISION DES RISQUES ÉPIDÉMIQUES

Actuellement, malgré les énormes progrès dans le domaine de la télédétection, ces outils sont relativement peu appliqués en agriculture en particulier dans le développement d'outils de

décision et d'évaluation des risques potentiels de maladies. Ces outils fournissent pourtant des informations utiles pour une agriculture de précision (Maggi et Qinghua, 2007).

Le radar météorologique constitue un moyen privilégié pour détecter les phénomènes de précipitations et pour évaluer de façon quasi instantanée la répartition des intensités de précipitations sur des surfaces étendues. Les résultats des études menées ces dernières années sur l'application du radar dans les prévisions météorologiques et particulièrement dans des applications hydrologiques (conduites dans différentes régions du monde) ont abondamment démontré que la qualité des mesures radar (dans des conditions convenables d'exploitation) est suffisante pour satisfaire une large gamme de besoins en météorologie et en hydrologie (Andrieu et al., 1997; Berne et al., 2005; Einfalt et al., 2004; Gillespie et Sentelhas, 2008; Sauvageot, 1994). Néanmoins, l'application agrométéorologique des données radar est moins déployée. En effet, l'utilisation qualitative et quantitative des données radar comme données d'entrée de modèles de prévision des maladies des plantes n'est pas encore largement répandue. Cette utilisation exige une bonne connaissance de la qualité des estimations de précipitations fournies par le radar.

Le radar permet d'observer en temps réel, les précipitations sur un large domaine avec une très bonne résolution spatiale et temporelle. Les estimations de précipitations dérivées des observations radar sont cependant entachées par différentes sources d'erreur qui les rendent moins précises que les mesures de précipitations des pluviomètres. Certaines erreurs affectent les mesures de réflectivité et d'autres les estimations de précipitations dérivées des réflectivités mesurées à une certaine altitude (Einfalt et al., 2004; Joss et Waldvogel, 1990). Enfin, de nouvelles erreurs apparaissent lorsqu'on estime le cumul de précipitations car le radar n'observe pas les précipitations de manière continue mais avec un échantillonnage temporel (qui est de 5 minutes pour le radar de Wideumont) (Delobbe, 2006). De nombreux efforts sont actuellement entrepris pour améliorer les estimations radar de précipitations pour des applications agrométéorologiques (Gillespie et Sentelhas, 2008). La méthode la plus classique pour améliorer la qualité des cumuls de précipitations observées par le radar consiste à corriger les cumuls radar à l'aide de données pluviométriques au sol. Cette méthode, dite d'ajustement aux pluviomètres (Einfalt et al., 2004; Sauvageot, 1992), peut être implémentée de différentes manières, selon les échelles spatiales et temporelles auxquelles on applique la correction. Une telle procédure d'ajustement, simple et robuste, a été récemment implémentée à l'IRM pour corriger les cumuls de 24-h de précipitations (Delobbe, 2006).

Les observations par des pluviomètres fournissent une mesure directe des précipitations au sol. Un réseau de pluviomètres permet des mesures ponctuelles des précipitations qu'il convient d'interpoler afin de reconstituer le champ pluvieux complet. Cette opération s'avère cependant peu fiable lorsque la pluie présente une grande variabilité spatiale (Cicogna et al., 2005). Dans la littérature on trouve peu d'informations sur la relation entre la densité des réseaux de stations pluviométriques et la variabilité spatiale de précipitations (Workneh et al., 2005). Les données disponibles indiquent que la distance entre les stations devrait être au maximum de 5 km pour expliquer plus de 90% de la variabilité spatiale des précipitations horaires (Hubbard, 1994; Krajewski et al., 2003). Un tel réseau serait trop coûteux et irréaliste. Le radar météorologique offre la possibilité d'estimer certaines quantités météorologiques (comme les précipitations) dans un rayon de plusieurs dizaines de kilomètres à des pas de temps de quelques minutes.

À l'heure actuelle, au sud de la Belgique et au G-D de Luxembourg, les systèmes d'avertissements mis en place se basent sur des données de précipitations fournies par des réseaux de stations météorologiques situées à différentes distances des exploitations agricoles. Pour les champs éloignés de stations météorologiques, la valeur de l'avertissement pourrait être remise en question. L'absence d'information météorologique près des champs de culture reste une limitation majeure à l'application des systèmes de prédiction et des outils d'aide à la décision pour les risques épidémiques (Magarey et al., 2001; Magarey et Sutton, 2007; Workneh et al., 2005).

De plus, la grande majorité des études consacrées à l'utilisation agrométéorologique des données radar se sont intéressées à l'évaluation des estimations de la durée de précipitations en relation avec la durée d'humectation mesurée au niveau des stations agrométéorologiques (Laurence et al., 2002; Rowlandson et al., 2004; Rowlandson et al., 2009; Workneh et al., 2005; Workneh et al., 2006). La détermination précise des périodes d'humectation nous impose la connaissance de l'état de mouillabilité du couvert après la pluie. Les périodes d'humectation ne dépendent pas uniquement de la durée de la pluie, mais aussi de l'état du couvert après un événement pluvieux. L'intérêt de l'information radar dans ce contexte reste à apprécier.

PROBLÉMATIQUE ET APPROCHE ENVISAGÉE

POSITIONNEMENT DE NOTRE TRAVAIL DANS LE CADRE D'UNE PRÉVISION ÉPIDÉMIQUE

Il est connu que l'environnement climatique gouverne en grande partie les différentes phases du cycle épidémique. Les facteurs climatiques tels que la température, la pluie et l'humidité relative sont d'une importance primordiale en épidémiologie (Rapilly, 1991). L'importance de ces paramètres dans le développement des maladies cryptogamiques justifie les nombreuses études effectuées, tant aux niveaux théoriques que pratiques, pour comprendre l'effet et les interactions de ces facteurs sur les processus d'infection. En outre, le nombre d'articles ayant trait à l'influence de la température et de la durée d'humectation sur les principales phases du cycle épidémique, est impressionnant.

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'objectif de cette recherche doctorale est de contribuer à l'amélioration du système d'avertissement des principales maladies du blé d'hiver au G-D de Luxembourg et dans le sud de la Belgique en agissant plus précisément sur deux points faibles du système actuel : la spatialisation de l'occurrence des précipitations et le calcul de la durée d'humectation permettant les infections.

Ce choix est justifié par la demande des utilisateurs du système d'avertissement qui réclament un système encore plus performant. Il arrive également à un moment où de nouvelles technologies et méthodes de suivi voient le jour mais n'ont pas encore été intégrées dans les systèmes actuels qui se réfèrent encore à des démarches datant des années 70 et 80. Il faut vérifier que ces nouvelles technologies (radar météorologique) et méthodes de suivi (calcul de la durée d'humectation) fournissent au système, des informations qui vont conduire à son amélioration.

Pour atteindre cet objectif, l'impact de la technologie radar et des périodes d'humectation sur l'estimation des périodes d'infection de *S. tritici* sera étudié à travers deux modèles agrométéorologiques : le modèle SWEB, pour la détermination de la durée d'humectation, et le modèle PROCULTURE pour la simulation des périodes d'infection de la septoriose sur les feuilles de blé d'hiver.

Pour ce faire, notre travail consiste à :

(i) valider des estimations de précipitations radar en vue de leur utilisation comme données d'entrée aux deux modèles agrométéorologiques ;

(ii) appliquer un modèle de détermination de la durée d'humectation et comparer les périodes d'humectation simulées par le modèle d'humectation avec les périodes d'infection de *S. tritici* observées et simulées par le modèle de prévision des risques de septoriose.

PRIORITÉ DANS LE CADRE DE LA THÈSE

Pour ce travail de thèse nous avons dû réduire nos objectifs initiaux et nous avons ainsi défini des axes de recherches prioritaires.

Pour la validation des données radar, notre travail s'est surtout concentré sur l'étude de l'occurrence des précipitations dans le but de mieux simuler les périodes d'infection de la septoriose dans les parcelles de blé. La validation quantitative détaillée visant à estimer les cumuls de pluies à partir des données radar sur toute la période étudiée a seulement été effleurée.

Concernant l'application des modèles de la durée d'humectation nous nous sommes surtout concentrés sur l'aspect épidémiologique de l'humectation, c'est-à-dire la détermination de la durée d'humectation qui aboutit au déclenchement des périodes d'infection.

Enfin, vu son importance comme principale maladie du blé d'hiver et son effet sur le rendement, nous avons limité notre analyse au développement de la septoriose.

HYPOTHÈSE DU TRAVAIL

Pour atteindre les objectifs fixés pour notre travail de recherche, nous avons formulé les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : Le radar estime l'occurrence de précipitations avec la même précision que la mesure de pluviomètres au sol.

Hypothèse 2 : La méthode la plus classique pour améliorer la qualité des cumuls de précipitations observés par le radar consiste à corriger les cumuls radar à l'aide de données pluviométriques au sol. La précision fournie par les mesures pluviométriques utilisées comme référence ("ground truth") est la même pour toutes les catégories de précipitations.

Hypothèse 3 : Les données radar seront utilisées comme données d'entrée du modèle de simulation épidémique de la même manière que les données des pluviomètres.

Hypothèse 4 : La simulation de la durée d'humectation est moins précise que son mesurage par capteur.
Hypothèse 5 : La simulation de la durée d'humectation constitue une variable importante des modèles de simulation des maladies de blé d'hiver au G-D de Luxembourg.

Il s'agit donc de répondre aux questions suivantes pour vérifier ces hypothèses :

- Quelle est la précision que l'on peut attendre des données radar pour être utilisées dans des applications agrométéorologiques et phytosanitaires ? Quels traitements doivent-elles subir pour assurer leur crédibilité ?
- Le système d'avertissement existant actuellement au G-D de Luxembourg utilise des modèles qui se basent sur les règles faisant appel à un seuil d'humidité relative, généralement supérieur à 85 ou 90%. Y aurait-il des améliorations si on introduit le paramètre "durée d'humectation" dans les systèmes de protection de la culture de blé d'hiver déjà mis en place ?

APPROCHE ENVISAGÉE

Ce travail va étudier les potentialités du radar météorologique et les périodes d'humectation pour le contrôle des périodes d'infection de la septoriose sur chaque étage foliaire du blé d'hiver. La figure ci-dessous (Figure 2) représente le cadre général dans lequel s'insère notre travail. Un système intégré de modèles interactifs est envisagé. Il a pour objectif général de gérer les interactions climat/plante/parasite. Le système est schématisé ici sous forme d'un triangle où les trois composantes du système intégré sont présentées sur les trois sommets du triangle : le complexe parasitaire, l'hôte et les conditions du milieu. Le système sera mis en place en intégrant les données d'observations sur la parcelle, la maladie, des données agrométéorologiques et des contraintes économiques.
Pour les données radar, l'approche envisagée consiste à évaluer les potentialités du radar météorologique de Wideumont par l'analyse du signal radar et la comparaison statistique des occurrences de précipitations au sol avec celles estimées par le radar pour divers types de précipitations et différentes distances par rapport au radar. Le contrôle se fera en utilisant le réseau au sol de stations météorologiques automatiques. Une base de données sera construite pour définir les données d'entrée du système (Phase 1-Figure 2).

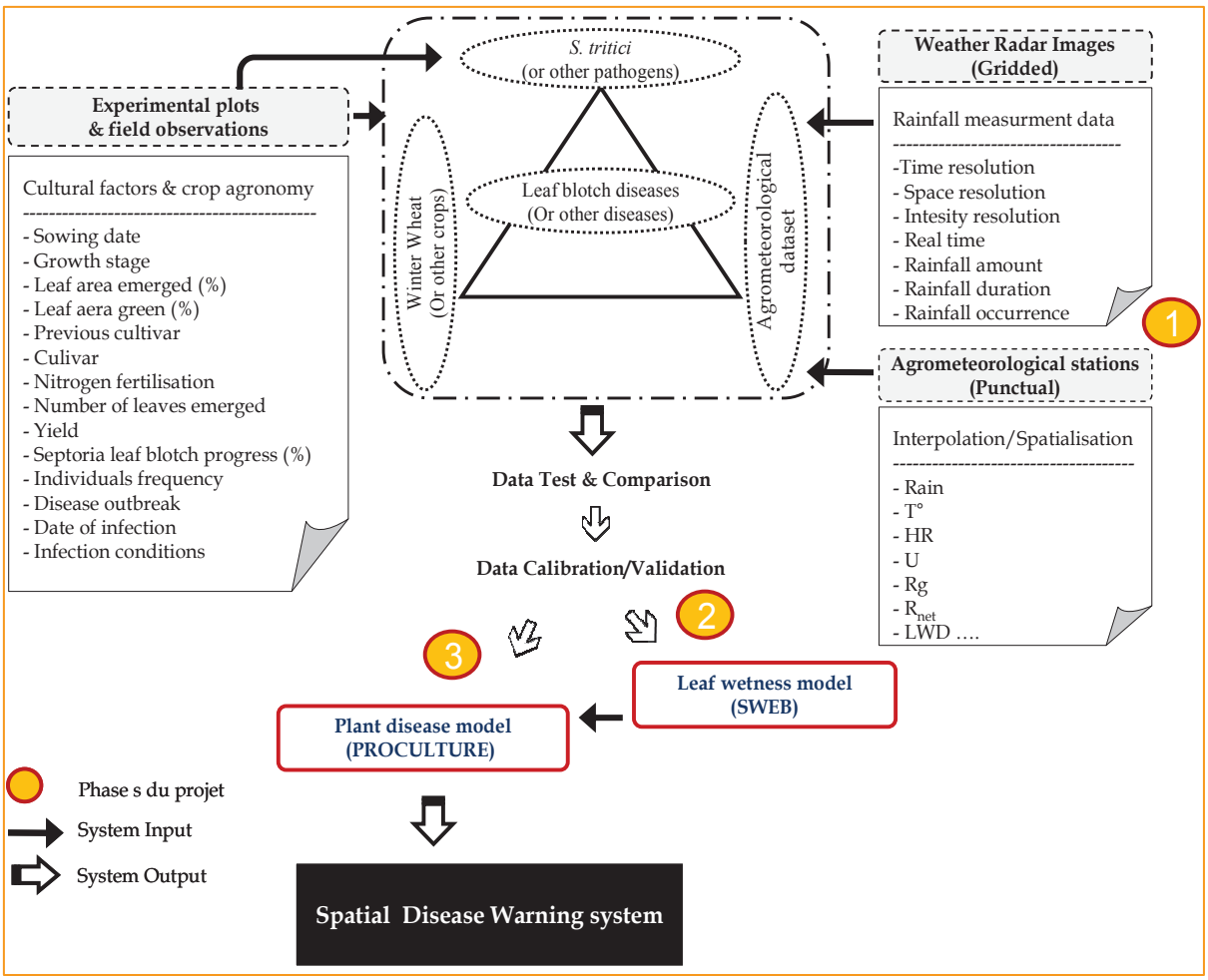


Figure 2. Schéma représentant le cadre général du travail, les différentes phases du projet et de la méthodologie envisagée.

La bibliographie met en évidence plusieurs modèles de la durée d'humectation. Dans un premier temps, nous devons, donc, choisir un modèle de durée d'humectation en fonction de la pluie et du dépôt de rosée sur le couvert de blé. L'évaluation et l'application du modèle se feront sur différentes variétés de blé en tenant compte de la variabilité spatiotemporelle de la durée d'humectation. Cette évaluation se fera par la détermination du temps que mettront les feuilles pour sécher après un épisode pluvieux ou par la mesure de la durée des temps de rosée (Phase 2-Figure 2).

Dans la dernière étape, on évaluera l'efficacité de la nouvelle approche intégrant la durée d'humectation, par une analyse des avantages et des limites, et ceci dans une perspective de système opérationnel. L'analyse de l'efficacité se basera sur la comparaison des résultats de la détermination des moments d'infection obtenus par la nouvelle approche avec ceux existants, proposés par le système PROCULTURE (Phase 3-Figure 2).

La majorité de nos expérimentations ont eu pour objectifs d'acquérir les connaissances et les données épidémiologiques nécessaires à l'évaluation du modèle de la détermination de la durée d'humectation dans des champs de blé. Pour ce faire, nous avons effectué une partie de nos travaux en micro-parcelles et l'autre partie en plein champ.

LA STRUCTURE DU DOCUMENT

La première partie de ce document (Partie I) concerne le radar météorologique. Le premier chapitre (Partie I-Chapitre 1) décrit d'abord le fonctionnement général et le principe de mesure du signal radar, les différentes sources d'erreur qui affectent les estimations de précipitations dérivées des observations radar. Le chapitre 2 (Partie I-Chapitre 2) porte sur la méthodologie appliquée pour évaluer la précision et la fiabilité des estimations radar en comparaison avec des données de stations au sol. Enfin, dans le dernier chapitre (Partie I-Chapitre 3) nous présentons les résultats de l'impact des estimations radar des précipitations en lieu et place des réseaux de pluviomètres dans la simulation du développement de *S. tritici* sur les trois dernières feuilles du blé d'hiver.

La deuxième partie (Partie II) de ce document concerne l'humectation dans un couvert de blé d'hiver. Elle consiste en la détermination des conditions d'humectation minimale nécessaires à l'infection des feuilles de blé d'hiver par *S. tritici*. Le premier chapitre (Partie II- Chapitre 1) fait l'état d'une synthèse bibliographique sur le phénomène de l'humectation des surfaces végétales. Il passe ensuite en revue les différentes méthodes de la détermination de la durée d'humectation. Il justifie le choix de la méthode et du modèle retenu. Enfin, il rappelle brièvement les facteurs favorisant l'infection et le développement de la septoriose sur les feuilles de blé d'hiver. Le chapitre 2 (Partie II-Chapitre 2) traite de la mesure de la durée d'humectation à l'aide du capteur. L'application d'un modèle pour la détermination de la durée d'humectation pour la culture de blé a fait l'objet du troisième chapitre (Partie II-Chapitre 3) dans lequel les données simulées ont été comparées aux données observées et mesurées. Les performances du modèle retenu, SWEB, ont été ensuite évaluées dans le chapitre 4 (Partie II-Chapitre 4) en terme d'aptitude à reproduire les périodes d'infection de *S. tritici* observées et simulées par PROCULTURE. Une comparaison des résultats du modèle de prévision de *S. tritici* "PROCULTURE" a été faite avec ceux du modèle de la durée d'humectation SWEB afin de dégager les divergences entre les deux modèles et les améliorations qui peuvent être envisagées.

La dernière partie de ce document se propose de discuter de l'ensemble des résultats et des perspectives qui en résultent.

LISTES DES FIGURES

Figure 1. Cycle de vie de *Septoria tritici (Mycosphaerella graminicola*) responsable de la septoriose du blé d'hiver. 16
Figure 2. Schéma représentant le cadre général du travail, les différentes phases du projet et de la méthodologie envisagée. 25

RÉFÉRENCES

Andrieu, H., Creutin, J. D., Delrieu, G., and Faure, D. (1997). Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part I: radar measurement interpretation. *Journal of Hydrology* **193**, 1-25.

Anonymous. (2006). Models: Insects, Mites, Diseases, Plants, and Beneficials. *Available at http://www.ipm.ucdavis.edu/MODELS/index.html*.

Bass, B., Savdie, I., and Gillespie, T. J. (1991). Simulation of leaf wetness duration for field corn. *Agricultural and Forest Meteorology* **57**, 69-84.

Berne, A., ten Heggeler, M., Uijlenhoet, R., Delobbe, L., Dierickx, P., and de Wit, M. (2005). A preliminary investigation of radar rainfall estimation in the Ardennes region and a first hydrological application for the Ourthe catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **5**, 267-274.

Brown, J. K. M., Kema, G. H. J., Forrer, H. R., Verstappen, E. C. P., Arraiano, L. S., Brading, P. A., Foster, E. M., Fried, P. M., and Jenny, E. (2001). Resistance of wheat cultivars and breeding lines to *Septoria tritici* blotch caused by isolates of *Mycosphaerella graminicola* in field trials. *Plant Pathology* **50**, 325-338.

Butler, D. R. (1986). Evaporation from rain drops on leaves in a cereal canopy: a simulation model. *Boundary-Layer Meteorology* **36**, 39-51.

Campbell, C. L., and Madden, L. V. (1990). Introduction to plant disease epidemiology. *Monitoring epidemics: environment. John Wiley, London*, 43-73.

Chtioui, Y., Franc, L. J., and Panigrahi, S. (1999). Moisture prediction from simple micrometeorological data. *Phytopathology* **88**, 668-672.

Chungu, C., Gilbert, J., and Townley-Smith, F. (2001). *Septoria tritici* blotch development as affected by temperature, duration of leaf wetness, inoculum concentration, and host. *Plant Disease* **85**, 430-435.

Ciancio, A., and Mukerji, K. G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601. 359 pages.

Cicogna, A., Dietrich, S., Gani, M., Giovanardi, R., and Sandra, M. (2005). Use of meteorological radar to estimate leaf wetness as data input for application of territorial epidemiological model (downy mildew-*Plasmopara viticola*). *Physics and Chemistry of the Earth* **30**, 201-207.

Cooke, B. M. (2007). Disease assessment and yield loss. In: Ciancio, A., and Mukerji, K.G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601. 359 pages.

Dalla Marta, A., De Vincenzi, M., Dietrich, S., and Orlandini, S. (2005a). Neural network for the estimation of leaf wetness duration: application to a *Plasmopara viticola* infection forecasting. *Physics and Chemistry of the Earth* **30**, 91-96.

Dalla Marta, A., Gani, M., Cicogna, A., Dietrich, S., Orlandini, S., and Santorelli, E. (2007). Transboundary system for grapevine downy mildew risk evaluation on a territorial scale (P. Rada project). *Bulletin OEPV/EPPO* **37**, 290-294.

Dalla Marta, A., Magarey, R. D., and Orlandini, S. (2005b). Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 84-95.

Dalla Marta, A., Martinelli, L., and Orlandini, S. (2008). Leaf wetness spatial variability within grapevine canopy. *American Journal of Enology and Viticulture* **59**, 78-82.

De Vallavieille-Pope, C., Huber, L., Leconte, M., and Goyeau, H. (1995). Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration, and infection of *Puccinia-recondita f sp tritici*

and *P-striiformis* on wheat seedlings. *Phytopathology* **85**, 409-415.

Delobbe, L. (2006). Estimation des précipitations à l'aide d'un radar météorologique. Royal Meteorological Institute, Brussels, Belgium (see also http://www.kmi.be/).

Delos, M., Caron, D., Penaud, A., Naibor, B., and Faure, A. (2002). La lutte prophylactique, approche transversale des moyens de lutte permettant de réduire ou d'éviter le recours à la lutte chimique contre les ravageurs et les maladies des grandes cultures : "un nouveau regard par des méthodes anciennes". *In* "2ième Conférence Internationale sur les moyens alternatifs de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux", pp. 14-22, Lille.

Doyle, A. (2004). Know your enemy: The biology of *Septoria tritici*. *In* "*Septoria tritici* conference" (T. editor, ed.), pp. 4-10. Irish Farmers Journal.

Dutcher, J. d. (2007). A review of resurgence and replacement causing pest outbreaks in IPM. In: Ciancio, A., and Mukerji, K.G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601. 359 pages.

Einfalt, T., Nielsen, A. K., Golz, C., Jensen, N. E., Quirmbach, M., Vaes, G., and Vieux, B. (2004). Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage. *Journal of Hydrology* **299**, 186-202.

El Jarroudi, M. (2005). Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au G-D de Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision. *Thèse de Doctorat, Université de Liège*.

El Jarroudi, M., Delfosse, P., Maraite, H., Hoffmann, L., and Tychon, B. (2009). Assessing the accuracy of simulation model for *septoria* Leaf blotch disease progress on winter wheat. *Plant Disease* **93**, 983-992.

El Jarroudi, M., Tychon, B., and Maraite, H. (2002). Validation of "Proculture" model to predict *Septoria tritici* on winter wheat in the G-D of Luxembourg in 2001. *In* "VII Congress of the European Society for Agronomy", pp. 275-276. Book of Proceedings (Editors : Francisco J. Villalobos & Luca Testi). Consejeria de Agricultura y Pesca. Congresos y Jornadas. ISBN 84-8474-059-5, Cordoba. Spain.

El Jarroudi, M., Tychon, B., Maraite, H., Hoffmann, L., and Toure, S. (2004). Use of the Monte Carlo method for evaluating the meteorological parameters which favour the epidemic of the yellow rust in the Grand Duchy of Luxemburg. *In* "VIII ESA Congress : European Agriculture in a global context" (S.-E. J. JACOBSEN, C.R.; PORTER, J.R., ed.), pp. ISBN 87-7611-062-1. pp.83-84, KVL. Copenhagen. Denmark.

Eyal, Z. (1999). The *Septoria tritici* and *Stagonospora nodorum* blotch diseases of wheat. *European Journal of Plant Pathology* **105**, 629-641.

Eyal, Z., Scharen, A. L., Huffman, M. D., and Prescott, J. M. (1985). Global insights into virulence frequencies of *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology* **75**, 1456-1462.

Forrest, W., and Nutter, J. R. (2007). The role of plant disease epidemiology in developing successful integrated disease management programs. In: Ciancio, A., and Mukerji, K.G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601, 359 pages. 45-79.

Getz, R. R. (1992). Report on the Measurement of Leaf Wetness. *WMO Publication, Geneva*.

Giesler, L. J., Horst, G. L., and Yuen, G. Y. (1996). A site-specific sensor for measuring leaf wetness duration within turfgrass canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* **81**, 145-156.

Gillespie, T. J., and Sentelhas, P. C. (2008). Agrometeorology and plant disease management - a happy marriage. *Scientia Agricola* **65**, 71-75.

Gladders, P., Paveley, N. D., Barrie, I. A., Hardwick, N. V., Hims, M. J., Langton, S., and Taylor, M. C. (2001). Agronomic and meteorological factors affecting the severity of leaf blotch caused by *Mycosphaerella graminicola* in commercial wheat crops in England. *Association of Apllied Biologists* **138**, 301-311.

Gleason, M. L., Duttweiler, K. B., Batzer, J. C., Taylor, S. E., Sentelhas, P. C., Monteiro, J., and Gillespie, T. J. (2008). Obtaining weather data for input to crop disease-warning systems: leaf wetness duration as a case study. *Scientia Agricola* **65**, 76-87.

Gleason, M. L., Taylor, S. E., Loughin, T. M., and Koehler, K. J. (1994). Development and validation of an empirical-model to estimate the duration of dew periods. *Plant Disease* **78**, 1011-1016.

Henze, M., Beyer, M., Klink, H., and Verreet, J. A. (2007). Characterizing meteorological scenarios favorable for *Septoria tritici* infections in wheat and estimation of latent periods. *Plant Dis.* **91**, 1445-1449.

Hess, D. E., and Shaner, G. (1987a). Effect of moisture and temperature on development of *septoria tritici* blotch in wheat. *Phytopathology* **77**, 215-219.

Hess, D. E., and Shaner, G. (1987b). Effect of moisture on *Septoria tritici* blotch development on wheat in the field. *Phytopathology* **77**, 220-226.

Hoppmann, D., and Wittich, K. P. (1997). Epidemiology-related modelling of the leaf-wetness duration as an alternative to measurements, taking *Plasmopara viticola* as an example. *Zeitschrift Fur Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz-Journal of Plant Diseases and Protection* **104**, 533-544.

Hubbard, K. G. (1994). Spatial variability of daily weather variables in the high-plains of the USA. *Agricultural and Forest Meteorology* **68**, 29-41.

Huber, L. (1988). Modèle de simulation de la durée d'humectation des feuilles au champ après une pluie. Cas d'un couvert homogène. *Agronomie* **8**, 675-684.

Huber, L. (1992). Déterminisme et mesure de la durée d'humectation en vue de la protection des plantes. *Agronomie* **12**, 281-295.

Huber, L., and Gillespie, T. J. (1992). Modeling leaf wetness in relation to plant-disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology* **30**, 553-577.

Hunter, Coker, and Royle (1999). The teleomorph stage, *Mycosphaerella graminicola*, in epidemics of *Septoria tritici* blotch on winter wheat in the UK. *Plant Pathology* **48**, 51-57.

Joss, J., and Waldvogel, A. (1990). Precipitation measurement and hydrology. Chapter 29a, Radar in meteorology. Battan memorial and fortieth anniversary radar meteorology conference (Atlas. D, ed). *Boston, American Meteorological society* 577-606.

Kim, K. S., Taylor, S. E., Gleason, M. L., and Koehler, K. J. (2002). Model to enhance site-specific estimation of leaf wetness duration. *Plant Disease* **86**, 179-185.

Kim, K. S., Taylor, S. E., Gleason, M. L., Villalobos, R., and Arauz, L. F. (2005). Estimation of leaf wetness duration using empirical models in northwestern Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology* **129**, 53-67.

King, J. E., Cook, R. J., and Melville, S. C. (1983). A review of *Septoria* diseases of wheat and barley. *Ann. Appl. Biol.* **103**, 345-373.

Krajewski, W. F., Ciach, G. J., and Habib, E. (2003). An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques* **48**, 151-162.

Lau, Y. F., Gleason, M. L., Zriba, N., Taylor, S. E., and Hinz, P. N. (2000). Effects of coating, deployment angle, and compass orientation on performance of electronic wetness sensors during dew periods. *Plant Disease* **84**, 192-197.

Laurence, H., Fabry, F., Dutilleul, P., Bourgeois, G., and Zawadzki, I. (2002). Estimation of the spatial pattern of surface relative humidity using ground based radar measurements and its application to disease risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology* **111**, 223-231.

Lhomme, J. P., and Jimenez, F. (1992). Estimating dew duration on banana and plantain leaves from standard meteorological observations. *Agricultural and Forest Meteorology* **62**, 263-274.

Lomas, J., and Shashoua, Y. (1970). The performance of three types of leaf wetness recorders. *Agricultural Meteorology* **7**, 159-166.

Lovell, D. J., Parker, S. R., Petghem, P. V., Webb, D. A., and Welham, S. J. (2002). Quantification of raindrop kinetic energy for improved prediction of plash-dispersed pathogens. *Phytopathology* **92**, 497-503.

Lulu, J., Sentelhas, P. C., Pedro, M. J., Pezzopane, J. R. M., and Blain, G. C. (2008a). Estimating leaf wetness duration over turfgrass, and in a 'niagara rosada' vineyard, in a subtropical environment. *Scientia Agricola* **65**, 10-17.

Lulu, J., Sentelhas, P. C., Pedro, M. J., Pezzopane, J. R. M., and Blain, G. C. (2008b). Spatial variability of leaf wetness duration in a 'niagara rosada' vineyard. *Engenharia Agricola* **28**, 104-114.

Luo, W., and Goudriaan, J. (2000). Dew formation on rice under varying durations of nocturnal radiative loss. *Agricultural and Forest Meteorology* **104**, 303-313.

Magarey, R. D. (1999). A theoretical standard for surface wetness estimation. *Ph.D. Diss. Cornell University, Ithaca, NY.*

Magarey, R. D., Seem, R. C., Russo, J. M., Zack, J. W., Waight, K. T., Travis, J. W., and Oudemans, P. V. (2001). Site-specific

weather information without on-site sensors. *Plant Disease* **85**, 1227-1229.

Magarey, R. D., and Sutton, T. B. (2007). How to create and deploy infection models for plant pathogens. In: Ciancio, A., and Mukerji, K.G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601. 359 pages.

Magarey, R. D., Weiss, A., Gillespie, T. J., Huber, L., and Seem, R. C. (2005). Estimating surface wetness on plants. In: Hatfield, J.L., Baker, J.M., Viney, M.K. (Eds.), Micrometeorological measurements in Agricultural systems. *American Society of Agronomy, Madison, WI*.

Magboul, A. M., Gengs, S., Gilchrist, D. G., and Jackson, L. F. (1992). Environmental influence on the infection of wheat by *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology* **82**, 1407-1413.

Maggi, K., and Qinghua, G. (2007). Integrated agricultural pest management through remote sensing and spatial analyses. In: Ciancio, A., and Mukerji, K.G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601, 359 pages. 45-79.

Maracchi, G. (2006). Meteorology application for agriculture *COST Action 718. pp*, 1-3.

Moreau, J. M., and Maraite, H. (1999). Integration of knowledge on wheat phenology and *Septoria tritici* epidemiology into a disease risk simulation model validated in Belgium. *Aspects of Applied Biology* **55**, 1-6.

Moreau, J. M., and Maraite, H. (2000). Development of an interaction decision-support system on a web site for control of *Mycosphaerella graminicola* in winter wheat. *Bulletin OEPV/EPPO* **30**, 161-163.

Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science* **144**, 31-43.

Papastamati, K., McCartney, H. A., and Van den Bosch, F. (2004). Modelling leaf wetness duration during the rosette stage of oilseed rape. *Agricultural and Forest Meteorology* **123**, 69-78.

Pedro, M. J. (1980). Relation of leaf surface wetness duration to meteorological parameters. In: Sentelhas PC, Gillespie TJ, Gleason ML, Monteiro JEBA, Helland ST (2004b) Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 59-72.

Pedro, M. J., and Gillespie, T. J. (1982). Estimating dew duration. II. Utilizing standard weather station data. *Agricultural Meteorology* **25**, 297-310.

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceeding of the Royal Society. London A193*, 120-146.

Rao, P. S., Gillespie, T. J., and Schaafsma, A. W. (1998). Estimating wetness duration on maize ears from meteorological observations. *Canadian Journal of Soil Science* **78**, 149-154.

Rapilly, F. (1991). Epidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. *In* "Epidémiologie en pathologie végétale" (L. T. Doc, ed.), pp. 240-261. Institut National de la Recherche Agronomique INRA. ISBN 2-7380-0297-8. 317 p, Paris.

Rowlandson, T. L., Gillespie, T. J., and Ford, R. P. (2004). Use of precipitation duration data from weather radar in leaf wetness estimates for plant disease management. *26th conference on Agricultural and Forest Meteorology*.

Rowlandson, T. L., Gillespie, T. J., and Ford, R. P. (2009). Application of canadian weather radar data to plant disease management schemes in Southern Ontario. *Atmosphere Oceane* **47**, 154–159.

Royer, M. H., Russo, J. M., and Kelley, J. G. W. (1989). Plant disease prediction using a mesoscale weather forecasting technique. *Plant Disease* **73**, 618-624.

Sabatini, F., Dalla Marta, A., Orlandini, S., and Zanchi, C. A. (2005). Review of leaf wetness duration sensors. In: Dalla Marta, A., Magarey, R. D., And Orlandini, S. (2005). Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 84-95.

Sauvageot, H. (1992). Radar Meteorology. Eyrolles, Paris.

Sauvageot, H. (1994). Rainfall measurement by radar - a review. *Atmospheric Research* **35**, 27-54.

Seelan, S. K., Laguette, S., Casady, G. M., and Seielstad, G. A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment* **88**, 157-169.

Seem, R. C., Magarey, R. D., Zack, J. W., and Russo, J. M. (2000). Estimating disease risk at the whole plant level with General

Circulation Models. *Environmental Pollution* **108**, 389-395.

Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Batzer, J. C., Gleason, M. L., Monteiro, J., Pezzopane, J. R. M., and Pedro, M. J. (2005). Spatial variability of leaf wetness duration in different crop canopies. *International Journal of Biometeorology* **49**, 363-370.

Sentelhas, P. C., Monteiro, J., and Gillespie, T. J. (2004). Electronic leaf wetness duration sensor: why it should be painted. *International Journal of Biometeorology* **48**, 202-205.

Shaner, G., and Buechley, G. (1995). Epidemiology of leaf blotch of soft red winter wheat caused by *Septoria tritici* and *Stagonospora nodorum*. *Plant disease* **79**, 928-938.

Shaner, G., and Finney, R. (1976). Weather and epidemics of *Septoria* leaf blotch of wheat. *Phytopathology* **66**, 781-785.

Shaw, M. W. (1990). Effects of temperature, leaf wetness and cultivar on the latent period on *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat. *Plant Pathology* **39**, 255-268.

Shaw, M. W. (1991). Interacting effects of interrupted humid periods and light on infection of wheat leaves by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*). *Plant Pathology* **40**, 595-607.

Shaw, M. W., and Royle, D. J. (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, M. W., and Royle, D. J. (1993). Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) on winter wheat in the U.K. *Plant Pathology* **42**, 882-899.

STATEC (2007). Aspects de l'agriculture en 2006. Le recensement agricole 2006. **n° 2-07**.

Thomas, M. R., Cook, R. J., and King, J. E. (1989). Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its affect on yield. *Plant Pathology* **38**, 246-257.

Verreet, H., Klink, J. A., and Hoffmann, G. M. (2000). Regional monitoring for disease prediction and optimization of plant protection measuares: The IPM wheat model. *Plant Disease* **84**, 816-826.

Vitousek, P. M., D'Antonio, C. M., Loope, L. L., and Westbrooks, R. (1996). Biological invasions as global environmental change. *American Scientist* **84**, 468-479.

Waggoner, P. E., Norvell, W. A., and Royle, D. J. (1980). The law of the minimum and the relation between pathogen, weather, and disease. *Phytopathology* **70**, 59-64.

Weihong, L., and Goudriaan, J. (1991). Analysis of leaf wetness in the rice crop caused by dew formation. A simulation study. *Bulletin OEPV/EPPO* **21**, 551-559.

Weiss, A., and Lukens, D. L. (1981). Electronic circuit for detecting leaf wetness and comparison of two sensors. *Plant Disease* **65**, 41-43.

Workneh, F., Narasimhan, B., Srinivasan, R., and Rush, C. A. (2005). Potential of radar-estimated rainfall for plant disease risk forecast. *Phytopathology* **95**, 25-27.

Workneh, F., Narasimhan, B., Srinivasan, R., and Rush, C. M. (2006). Assessment of regional site-specific *Sorghum ergot* severity potential using radar-rainfall measurement. *Plant Disease* **90**, 704-707.

Workneh, F., Rush, C. M., Narasimhan, B., and Srinivasan, R. (2004). Steps towards development of a site-specific *Sorghum ergot* risk forecast system. *Phytopathology* **94**, S111-S111.

Yarwood, C. E. (1978). Water and the infection process. *In T.T. Kozlowski (ed.) Water deficits and plant growth, Academic Press, New York* **5**, 141-173.

Yuen, J. E., and Hughes, G. (2002). Bayesian analysis of plant disease prediction. *Plant Pathology* **51**, 407-412.

PARTIE I : APPLICATION À L'AGROMÉTÉOROLOGIE DU RADAR MÉTÉOROLOGIQUE

PARTIE I

Application à l'agrométéorologie du radar météorologique

Chapitre 1 : *Problématique liée à la technologie des radars météorologiques*

Chapitre 2 : *Estimation des précipitations à l'aide d'un radar météorologique*

Chapitre 3 : *Validation des estimations radar pour des applications agrométéorologiques : cas du contrôle de périodes d'infections de S. tritici au G-D de Luxembourg*

PARTIE I

Chapitre 1

Problématique liée à la technologie des radars météorologiques

RÉSUMÉ

On trouvera dans le présent chapitre les notions élémentaires sur les radars météorologiques. Ce chapitre, étayé par une importante recherche bibliographique, porte en particulier sur les différentes sources d'erreurs et les caractéristiques opérationnelles à prendre en compte lors de l'exploitation des données radar destinées aux applications agrométéorologiques. On trouvera un bref aperçu des systèmes radar, le fonctionnement général du radar et le principe de mesure. Les différentes erreurs qui peuvent affecter la qualité des estimations seront brièvement décrites et illustrées par des exemples observés par le radar de Wideumont.

Cette partie a été réalisée lors d'un stage à l'IRM dont le but était de se familiariser avec le système radar (étude bibliographique, principe de mesure, sources d'erreur, fonctionnement du système, génération des produits, format des fichiers de données), l'intégration des données radar et des données des pluviomètres dans le système de gestion de base de données Oracle et enfin, la validation des occurrences de précipitations.

Mots clés: *Système radar, Radar météorologique de Wideumont.*

1. INTRODUCTION

Depuis novembre 2001, l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM) exploite les données du radar météorologique de Wideumont (province de Luxembourg). Le radar couvre une grande partie du territoire wallon et, dans un rayon de 80 kilomètres, la totalité du G-D de

Luxembourg. Il fournit des données à un intervalle de temps de 5 minutes sur une grille (pixel image) dont la taille est de l'ordre de 600 mètres de côté. La portée maximale du radar, pour la détection des précipitations, est de 240 kilomètres mais une estimation réaliste de l'intensité des précipitations n'est possible que dans un rayon de l'ordre de 100 kilomètres. Le radar météorologique de Wideumont présente l'avantage, par rapport aux stations météorologiques classiques, de permettre une localisation précise sur tout le territoire des différents épisodes pluvieux observés durant la période de maladie des plantes.

Nous émettons l'hypothèse que l'utilisation de nouveaux instruments météorologiques, tels que le radar météorologique et les réseaux de stations météorologiques automatiques, pourraient être capables de fournir de nouvelles informations jamais obtenues jusqu'à présent.

Dans ce chapitre, nous décrivons brièvement les principes de fonctionnement des radars météorologiques et les différentes sources d'erreurs qui affectent les données radar en nous basant sur différentes documentations obtenue à l'IRM.

2. PRINCIPE DE BASE DU FONCTIONNEMENT DES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES

2.1. Principe de mesure du signal radar

Le système radar est constitué du système d'émission, de l'antenne et du système de réception. L'antenne balaye constamment l'horizon avec une vitesse de rotation de l'ordre de 3 tours par minute. Pendant sa rotation l'antenne émet des impulsions électromagnétiques qui se propagent dans l'atmosphère à la vitesse de la lumière.
Les radars météorologiques émettent dans l'atmosphère des ondes électromagnétiques en courtes impulsions, focalisées en un faisceau conique étroit qui balaye l'atmosphère à différents azimuts et angles d'élévation (Figure I-1-1). Lorsqu'une impulsion rencontre une zone de précipitations, elle est en partie réfléchie et renvoyée vers le radar. Le temps qui s'écoule entre l'émission de l'impulsion et la réception de signal réfléchi constitue une mesure de la distance. L'intensité du signal reçu fournit une estimation de l'intensité des précipitations. Le balayage de l'atmosphère par l'onde à différents angles d'élévation permet de récolter des données à 3 dimensions.

La plupart des radars en Europe émettent à une fréquence dans la bande C, c'est-à-dire proche de 5 GHz. La fréquence du radar de Wideumont est de 5.640 GHz, ce qui correspond à une

longueur d'onde de 5.3 cm. Le tableau 1 (Table I-1-1) donne les principales caractéristiques du radar de Wideumont.

L'angle d'ouverture de l'antenne est de 1 degré. Cet angle détermine la résolution verticale ainsi que la résolution en azimut des mesures radar. Pour le balayage standard du radar de Wideumont, la résolution en distance est de 250 m. Les résolutions spatiales verticales, en azimut et en distance déterminent le volume d'échantillonnage du radar (Delobbe, 2006; Delobbe et al., 2006; Delobbe et Holleman, 2006).

Le signal que réfléchit une cible météorologique à partir de l'impulsion émise s'appelle l'écho. L'impulsion possède une amplitude, une phase et une polarisation. La plupart des radars météorologiques opérationnels dans le monde restent limités à l'analyse de la caractéristique d'amplitude liée à la répartition granulométrique et au nombre de particules se trouvant dans le volume capté par le faisceau radar (enveloppe d'impulsion). L'amplitude sert à déterminer un paramètre appelé facteur de réflexion ou réflectivité (Z) qui permet, grâce à l'emploi de rapports empiriques, d'évaluer la masse de précipitations dans le volume échantillonné ou l'intensité des précipitations.

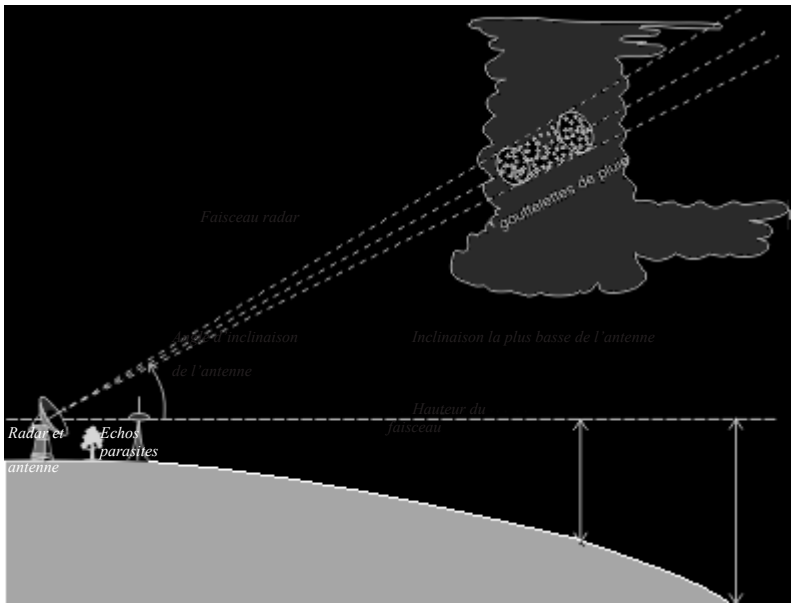


Figure I-1-1. Propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère dans le cas du radar météorologique (Note technique N°8 de l'OMM).

2.2. Équation radar

Le radar mesure la puissance de l'écho renvoyé par les cibles présentes dans l'atmosphère. Comme décrit précédemment, ces mesures forment un champ à trois dimensions. Dans cette section, nous décrivons comment ces données tridimensionnelles de réflectivité sont converties en une image à deux dimensions du taux de précipitations. Pour une cible météorologique la moyenne sur plusieurs impulsions de la puissance du signal renvoyé au radar (P_r), exprimée en Watt, est donnée par :

$$P_r = (C|K|^2 Z) / R^2 \qquad (1)$$

Où

C : constante dépendant des caractéristiques radar ;
K : constante diélectrique ($|K|^2 = 0.93$ pour l'eau et $|K|^2 = 0.197$ pour la glace) ;
R : distance séparant le radar de la cible ;
Z : la réflectivité.

Cette équation, dite "équation du radar", sert à déterminer la réflectivité Z qui permet, grâce à l'emploi d'une relation empirique, d'évaluer la masse de précipitations dans le volume échantillonné ou l'intensité des précipitations (Note technique N°8 de l'OMM; Sauvageot, 1992).

La réflectivité est la grandeur qui est mesurée par le radar. Ce facteur se définit théoriquement comme la somme des diamètres (D) des particules (gouttes) contenues dans le volume sondé, élevée à la puissance six :

$$Z = \int_0^\infty N(D) \, . \, D^6 \, dD \qquad (2)$$

où Z est exprimé en $mm^6\ m^{-3}$. Plus les gouttes sont nombreuses ou grosses, plus Z est élevé. Le nombre, la composition et la forme des particules étant inconnus, on définit une réflectivité équivalente ou effective Z_e (Note technique N°8 de l'OMM).

La relation empirique Z-R est donnée par Marshall et Palmer (1948) :

$$Z = aR^b \quad (Z \text{ est en } mm^6.m^{-3} \text{ et } R \text{ en mm/h}) \qquad (3)$$

Pour les applications opérationnelles, les paramètres a et b sont fixés à une valeur constante quelles que soient les conditions météorologiques. Les valeurs les plus couramment utilisées en Europe sont a = 200 et b = 1.6. Ce sont ces valeurs qui sont utilisées pour le radar de Wideumont.

La caractérisation de la distribution en taille a fait l'objet de multiples recherches et de nombreuses relations Z-R ont été proposées dans la littérature. Jusqu'à présent, ces recherches n'ont cependant pas permis de proposer des solutions satisfaisantes pour améliorer de manière substantielle l'estimation des précipitations dans des conditions opérationnelles.

3. RADAR MÉTÉOROLOGIQUE DE WIDEUMONT

Le radar de l'Institut Royal Météorologique (IRM) de Belgique, installé dans le village de Wideumont, dans le sud de la Belgique (situé dans le voisinage des frontières luxembourgeoises et françaises), est opérationnel depuis novembre 2001. Ce radar (Table I-1-1) est de type Doppler en bande C de la firme Germatronik. Le radar émet à la longueur d'onde de 5.4 cm et possède une antenne parabolique de 4.2 mètres de diamètre. Le radôme (sphère blanche en polyester) qui le protège des vents et des intempéries est installé au sommet d'une tour de 50 mètres de haut, afin de dégager le faisceau radar des obstacles les plus proches. Le radar est entièrement commandé à distance, depuis le siège de l'IRM à Uccle; les données fournies par le radar sont transmises à Uccle où elles sont traitées puis diffusées. Le radar de Wideumont permet toutes les cinq minutes, après un scan à différents angles d'élévation, de fournir une image des précipitations dans un rayon de 240 kilomètres autour du radar.

Tableau I-1-1. Les principales caractéristiques du radar de Wideumont.

Property	**Value**
Location	Wideumont, Province of Luxembourg, Belgium
Date of initial operation	October 2001
Type of radar	Gematronik pulse Doppler
Frequency/wavelength	C-band (5.64 GHz/5.32 cm)
Height of tower base	535 m
Height of tower	50 m
Height of antenna	585 m
Diameter of antenna	4.2 m
Diameter of radome	6.7 m
Angles of elevation	0.3°, 0.9°, 1.8°, 3.3° and 6°
a/b *	200/0.6
Maximum range of reflectivity processing	240 km
Maximum range of Doppler processing	120 km
Typical range of resolution	0.5 km
Time interval between precipitation products	5 min

* a, b: empirically determined constants

Les images générées par le radar sont :

- Image précipitations 240 km (PseudoCAPPI (R))
- Image précipitations 120 km (PseudoCAPPI (R))
- Image Doppler (PseudoCAPPI (V))

4. LES PRINCIPALES SOURCES D'ERREURS

Le radar est le seul système d'observation météorologique permettant d'observer en temps réel la structure spatiale du champ de précipitations. L'estimation quantitative du taux de précipitations est cependant affectée par différentes sources d'erreur (certaines erreurs affectent les mesures de réflectivité et d'autres, les estimations de précipitations dérivées de ces mesures de réflectivité). Dans cette section, nous décrirons brièvement les principales sources d'erreur en les illustrant autant que possible par des exemples observés par le radar de Wideumont. Différents travaux ont été réalisés, nous citons à titre d'exemples les références suivantes : Joss et Waldvogel (1990), Doviak et Zrnic (1993), Collier et Lilley (1994), Steiner et al. (1999), Meischner (2003), Parent (2003) et Chumchean et al. (2006). La figure suivante (Figure I-1-2) illustre les différentes sources d'erreurs qui affectent les radars météorologiques.

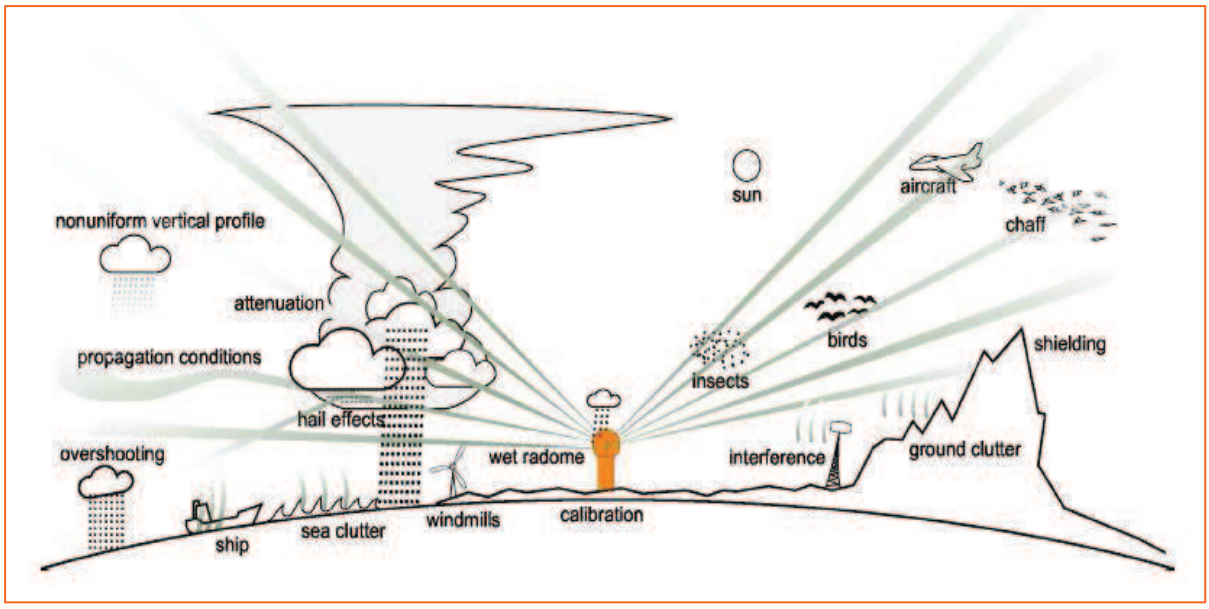


Figure I-1-2. Schéma représentant les principales sources d'erreur affectant la qualité des estimations radar de précipitations (Peura, 2006).
Schematic overview of the main sources of error affecting the quality of weather radar observations (Peura, 2006).

4.1. Mesure de réflectivité

4.1.1. Atténuation et amplification

Généralement, la puissance de l'onde sortant d'une zone de pluie pour en atteindre une seconde est sensiblement égale à la puissance entrante, ceci est quasiment toujours vrai pour une longueur d'onde en bande S (de longueur d'onde λ = 10 cm et de fréquence = 3 Ghz)[1]. En revanche, pour une longueur d'onde en bande C (de longueur d'onde λ = 5.33 cm et de fréquence = 5.6 Ghz), si les précipitations de la première zone sont intenses, on peut avoir une atténuation considérable ce qui conduit à une sous-estimation de la seconde cellule. La présence d'eau ruisselant sur le radôme de protection du radar peut aussi provoquer une atténuation significative.

La figure ci-après (Figure I-1-3) illustre le phénomène de l'atténuation. Certaines cellules orageuses jouent un rôle d'écran en atténuant fortement la propagation du faisceau radar.

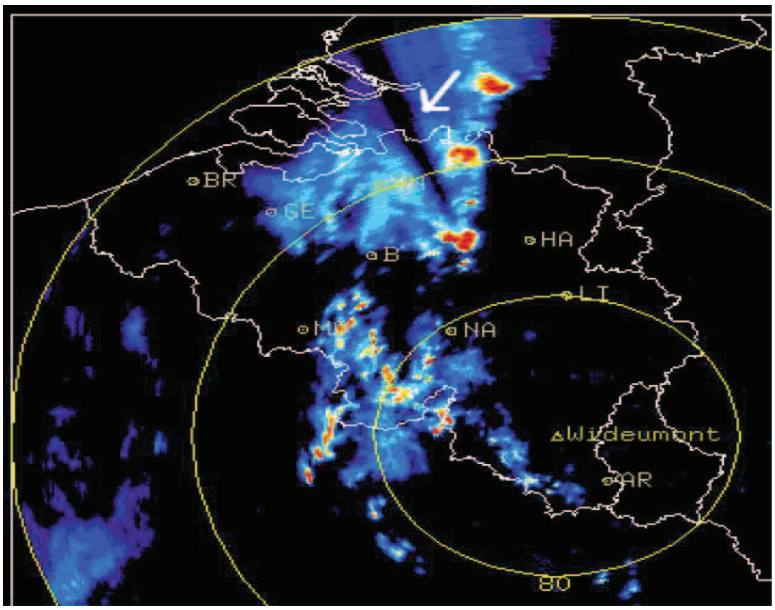


Figure I-1-3. Exemple d'atténuation (source IRM).

4.1.2. Échos du sol

Malgré tout le soin pris pour choisir les emplacements des radars, il existe toujours dans l'environnement plus ou moins proche des structures naturelles ou artificielles (arbres, immeubles, collines, montagnes, etc.) qui gênent la mesure, en renvoyant des échos dits échos fixes ou échos de sol. Ces échos affectent surtout les données récoltées à basse altitude et à

[1] La bande C est couramment utilisée pour l'observation en région tempérée. La bande S est utilisée dans les régions avec risque de pluies très intenses.

faible distance du radar. Les échos apparaissent sur les images radar comme des échos de précipitations. Une abondante littérature scientifique existe sur cette question ; elle propose des méthodes de détection ou de filtrage fondées sur le signal Doppler (Sugier et al., 2002), l'élévation de l'altitude d'observation ou l'utilisation de cartes d'échos fixes obtenues par temps sec (Hannesen, 2001; Parent, 2003).

Dans le cas du radar de Wideumont de nombreux échos au sol[2] ont été éliminés grâce à l'utilisation des cartes d'échos fixes[3] et grâce aussi au produit Pseudo CAPPI 1500 m qui permet, par interpolation des données de plusieurs élévations, de mesurer les précipitations à une altitude de 1500 m en évitant ainsi les échos du sol.

En conditions atmosphériques standards, les images du radar de Wideumont ne présentent pratiquement aucun écho du sol.

Malgré la procédure d'élimination des échos permanents et le filtrage Doppler, certains échos du sol persistent sur l'image radar. C'est particulièrement le cas lors des situations de propagation atmosphérique anormale (ANAPROP). Ces conditions généralement associées à des situations anticycloniques conduisent à une courbure du faisceau radar vers le bas telle que le lobe principal touche la Terre. Cette courbure est produite par la réfraction du faisceau due aux gradients verticaux de température et d'humidité. Une forte inversion de température est généralement à l'origine de conditions de propagation anormale. Le plus souvent, ces conditions apparaissent par temps sec.

4.1.3. La propagation anormale

Il s'agit d'échos de sol inhabituels qui se produisent lorsque les profils de température et d'humidité atmosphérique sont tels que le faisceau électromagnétique du radar est suffisamment incurvé vers le bas pour rencontrer le sol. Ils peuvent conduire à des erreurs de mesure très importantes sur la pluie et générer de fausses alertes (Figure I-1-4).

[2] Echos provenant du plateau de Hautes Fagnes, du plateau des Tailles, des massifs de la Croix Scaille et des massifs du Schneifel en Allemagne.
[3] Les cartes sont produites en soustrayant le tracé des échos radar en l'absence de précipitations du tracé obtenu en présence de précipitations.

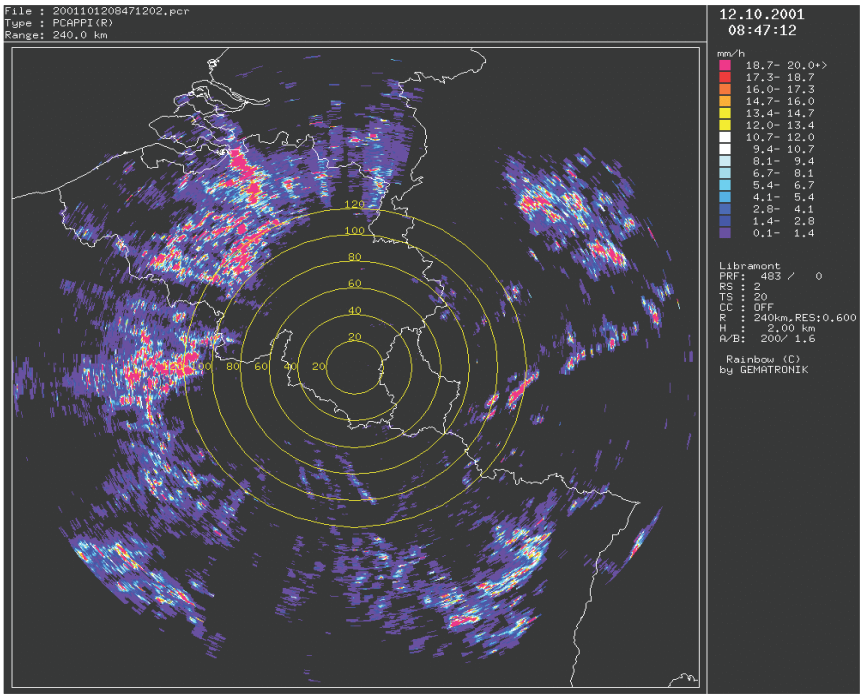


Figure I-1-4. Exemple de propagation anormale. Il s'agit d'une image prise le 12 octobre 2001 à 8h47 UT : l'image indique des larges zones de précipitations (Image du radar de Wideumont).

4.1.4. La résolution spatiale

Le volume échantillonné par le radar croît avec la distance au radar. Cela implique un lissage des champs de réflectivité observés par le radar à grande distance. Un noyau de forte réflectivité risque de ne remplir que partiellement le faisceau radar, ce qui induit une sous-estimation de la réflectivité maximale de ce noyau. A courte distance, les mesures seront en revanche extrêmement sensibles aux variations locales de réflectivité associées aux structures fines du champ de précipitations.

4.2. Estimation du taux de précipitations

4.2.1. Profil vertical de réflectivité

La réflectivité radar peut varier considérablement suivant l'altitude d'observation du système précipitant : elle peut être nulle au-dessus du nuage (ou même en dessous pour les précipitations en altitude sans signature au sol) (Figure I-1-5) ou, au contraire, elle peut être considérablement renforcée dans la zone de fusion où les flocons de neige ou grêlons, entourés d'une pellicule d'eau liquide, sont confondus par le radar avec de très grosses gouttes (phénomène appelé bande brillante) (Joss et Waldvogel, 1990).

L'observation en diversité de polarisation[4] paraît être la solution d'avenir à ce type de problème (Parent, 2003), mais les techniques utilisées de façon opérationnelle sont pour le moment toutes fondées sur l'observation volumique à partir de plusieurs angles d'élévation (entre 5° et 20°), ce qui permet de constituer un profil vertical de réflectivité (PVR). La précipitation au sol se déduit alors de la mesure en altitude, par extrapolation sur base du PVR estimé.

La figure I-1-5 montre que le taux de précipitations observé par le radar à une certaine altitude n'est pas identique au taux de précipitations observé au niveau du sol. Ces erreurs sont dues à l'évaporation (les précipitations peuvent subir une évaporation avant leur arrivée au sol) ce qui conduit également à des erreurs d'estimation des taux de précipitations, au remplissage partiel du faisceau (ce qui donne lieu à une sous-estimation du taux de précipitations que l'on dérive de la réflectivité), et à l'overshooting (le faisceau surmonte le sommet des nuages). Cet effet, limite considérablement la portée du radar lorsqu'on est en présence de précipitations stratiformes peu intenses qui sont générées à basse altitude. En revanche, des orages de forte extension verticale pourront être détectés sans peine jusqu'à une portée maximale de 240 km.

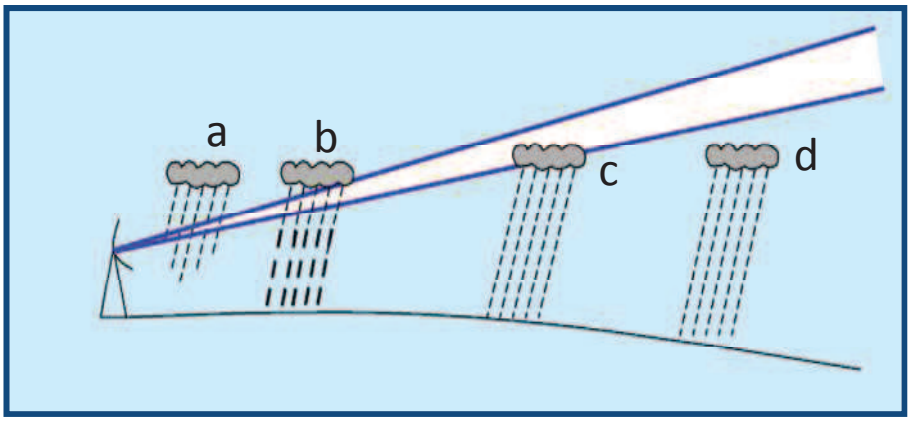


Figure I-1-5. La figure montre que le taux de précipitations observé par le radar à une certaine altitude n'est pas identique au taux de précipitations observé au niveau du sol : (a) évaporation (b) grossissement par condensation et/ou coalescence, (c) remplissage partiel du faisceau (d) et overshooting (Source IRM).

La non-uniformité du profil vertical de réflectivité est aujourd'hui considérée comme la principale source d'erreur affectant les estimations radar de précipitations (Joss et Waldvogel, 1990).

[4] Des études récentes laissent entrevoir la possibilité d'établir la différence entre divers types d'hydrométéores, premier pas vers la distinction entre la pluie, la neige et la grêle.

4.2.2. Relation Z-R

Le radar est un instrument de mesure indirecte. Il mesure la réflectivité en altitude alors qu'on cherche les taux de précipitations au niveau du sol. Diverses relations ont été établies, selon le type de précipitations, pour convertir la réflectivité en taux de précipitations. Il est cependant difficile de distinguer, uniquement à partir d'un radar, les divers types de précipitations et leur répartition granulométrique. Dans l'expression qui relie la puissance reçue à la réflectivité, la constante diélectrique est déterminée en supposant que la cible est constituée d'eau liquide. Par conséquent, les taux de précipitations associés aux chutes de neige seront généralement sous-estimés. Un ajustement automatique de la relation Z-R en fonction du type de précipitations est extrêmement difficile à mettre en œuvre dans des conditions opérationnelles (Einfalt et al., 2004). Dans les applications opérationnelles, cette diversité peut constituer une source importante d'erreurs. La conversion de la réflectivité Z en taux de précipitations R à l'aide d'une relation Z-R indépendante des conditions météorologiques introduit des erreurs en raison de la très grande variabilité de la distribution en taille des hydrométéores et de la relation Z-R qui en résulte. La phase des hydrométéores, solide ou liquide, influence également cette relation.

Ce problème peut être traité en adaptant la loi Z-R au type d'événement pluvieux, soit par des méthodes de type statistique, soit même à travers un recalage en direct sur des données pluviométriques. Une autre approche, qui, là encore, utilise la diversité de polarisation, est fondée sur l'estimation directe du diamètre des gouttes (Testud et al., 1999).

4.3. Cumul de précipitations

A partir des images radar instantanées générées toutes les 5 minutes, on peut obtenir une estimation du cumul de précipitations sur une période donnée par simple sommation des images de 5 minutes. De manière générale, l'échantillonnage temporel est une autre source d'erreur dans le calcul des cumuls pour toutes les structures de précipitations caractérisées par une grande variabilité spatiale et temporelle, comme les orages, par exemple.

5. CONCLUSIONS

- Le fonctionnement général et le principe de mesure du radar météorologique ont été décrits dans ce chapitre. Le radar permet d'observer en temps réel les précipitations sur un large domaine avec une très bonne résolution spatiale et temporelle. Lors de la validation des données radar par les stations au sol, les sources d'erreurs du radar doivent être prises en considération.

- Les sources d'erreur les plus importantes des données radar qui pourraient avoir joué un rôle dans cette étude sont : l'atténuation, les échos du sol, la propagation anormale, le phénomène de la bande brillante, d'overshooting et la mauvaise adéquation de la relation Z-R.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableaux :

Tableau I-1-1. Les principales caractéristiques du radar de Wideumont.. 38

Figures :

Figure I-1-1. Propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère dans le cas du radar météorologique. 36
Figure I-1-2. Schéma représentant les principales sources d'erreur affectant la qualité des estimations radar de précipitations.....39
Figure I-1-3. Exemple d'atténuation. 40
Figure I-1-4. Exemple de propagation anormale. Il s'agit d'une image prise le 12 octobre 2001 à 8h47 UT : l'image indique des larges zones de précipitations (Image du radar de Wideumont). 42
Figure I-1-5. La figure montre que le taux de précipitations observé par le radar à une certaine altitude n'est pas identique au taux de précipitations observé au niveau du sol : (a) évaporation (b) grossissement par condensation et/ou coalescence, (c) remplissage partiel du faisceau (d) et overshooting. 43

RÉFÉRENCES

Chumchean, S., Sharma, A., and Seed, A. (2006). An integrated approach to error correction for real-time radar-rainfall estimation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **23**, 67-79.

Collier, C. G., and Lilley, R. B. E. (1994). Forecasting thunderstorm initiation in north-west Europe using thermodynamic indices, satellite and radar data. *Meteorological Applications* **1**, 75-84.

Delobbe, L. (2006). Estimation des précipitations à l'aide d'un radar météorologique. Royal Meteorological Institute, Brussels, Belgium (see also http://www.kmi.be/).

Delobbe, L., Dehem, D., Dierickx, P., Roulin, E., Thunus, M., and Tricot, C. (2006). Combined use of radar and gauge observations for hydrological applications in the Walloon region of Belgium. *In* "Fourth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology", Barcelona, Spain.

Delobbe, L., and Holleman, I. (2006). Uncertainties in radar echo top heights used for hail detection. *Meteorological Applications* **13**, 361-374.

Doviak, R. J., and Zrnic, D. S. (1993). Doppler radar and weather observations. *Academic press, 2nd edition* 562.

Einfalt, T., Nielsen, A. K., Golz, C., Jensen, N. E., Quirmbach, M., Vaes, G., and Vieux, B. (2004). Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage. *Journal of Hydrology* **299**, 186-202.

Hannesen, R. (2001). Quantitative precipitation estimation from radar data : a review of current methodology. *MUSIC Project. European commission.*

Joss, J., and Waldvogel, A. (1990). Precipitation measurement and hydrology. Chapter 29a, Radar in meteorology. Battan memorial and fortieth anniversary radar meteorology conference (Atlas. D, ed). *Boston, American Meteorological society* 577-606.

Marshall, J. S., and Palmer, M. W. (1948). The distribution of rain drops with size. *Journal Meteorology* **5**, 165-166.

Meischner, P. (2003). Weather radar: Principles and Advanced Applications. . *Publié par Springer monograph series "Physics of Earth and Space Environment". ISBN 3540003282, 9783540003281*, 337 pages.

Note technique N°8 de l'OMM Organisation météorologique mondiale, 1985. Use of radar in meteorology (G. A. Clift). . *Note technique N° 181, OMM-N° 625, Genève.*

Parent, J. L. (2003). Aramis, le réseau français de radars pour la surveillance des precipitations. Météo-France. *La Météorologie* **40**, 44-52.

Peura, M. (FMI). Finnish Meteorological Institute. In Holleman, I. (2006). Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations. *Technical Report, KNMI TR-290*

Sauvageot, H. (1992). Radar Meteorology. Eyrolles, Paris.

Steiner, M., Smith, J. A., Burges, S. J., Alonso, C. V., and Darden, R. W. (1999). Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall

estimation. *Water Resources Research* **35**, 2487-2503.

Sugier, J., Parent, J., Roquain, P., and Smith, A. (2002). Clutter and anaprop suppression scheme for the Met Office and Météo-France weather radar. ERAD European. Conf. On weather radar. Delft, Pays-Bas, 18-23 November 2002.

Testud, J., Le Bouar, E., Obligis, E., and Ali-Mehenni, M. (1999). The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **17**, 322-356.

PARTIE I

Chapitre 2

Estimation des précipitations à l'aide du radar météorologique de Wideumont

RÉSUMÉ

L'utilisation quantitative et qualitative des données radar comme données d'entrée des modèles de prévision agrométéorologique n'est pas encore largement répandue. Cette utilisation exige une bonne connaissance de la qualité des estimations de précipitations fournies par le radar. Ce chapitre a précisément pour but de décrire la précision que l'on peut attendre des données radar. Les résultats de la validation des estimations de précipitations radar, par comparaison avec les données des stations pluviométriques, sont présentés dans ce chapitre. Ces résultats concernent des comparaisons portant sur les cumuls de précipitations horaires et mensuels. Les enseignements que l'on peut tirer de ces résultats sont rassemblés dans les conclusions de ce chapitre.

Mots clés: *Radar météorologique, Station agrométéorologique, Précipitations.*

1. INTRODUCTION

Depuis son introduction, le radar météorologique joue un rôle essentiel dans de nombreuses applications notamment dans les applications hydrologiques et agrométéorologiques (Atlas, 1990; Atlas et al., 1997; Gillespie et Sentelhas, 2008; Ryzhkov et al., 1998; Workneh et al., 2005). Le principal avantage de l'utilisation du radar météorologique est la description spatiale plus fine des champs de précipitations. De plus, le radar permet de détecter les précipitations jusqu'à une distance maximale de l'ordre de 240 km. Néanmoins, comme nous le verrons par la suite, la portée utile pour une estimation quantitative des précipitations est généralement beaucoup plus faible.

Les radars offrent d'énormes potentialités pour les applications agrométéorologiques, en particulier pour la prévision des maladies des plantes à cause de la description spatiale et

temporelle des champs de précipitations que de simples réseaux pluviométriques ne peuvent pas offrir. Toutefois, les mesures de précipitations sont fortement liées aux différentes sources d'erreurs de mesure du radar, précisées dans le chapitre précédent (Collier et Lilley, 1994; Joss et Waldvogel, 1990). Dans la littérature, de nombreuses techniques ont été proposées pour améliorer le système afin de compléter les mesures des stations au sol et de fournir des précipitations dans les zones où les pluviomètres ne sont pas disponibles.

Les erreurs de mesure du système radar devraient être mieux connues afin de fournir des estimations fiables pour un certain nombre d'applications agrométéorologiques. Bien que diverses techniques aient été développées pour les réduire, les erreurs résiduelles, c'est-à-dire les erreurs après mise en œuvre de traitements des données radar, demeurent souvent significatives. Elles mènent souvent à des erreurs dans les systèmes de prévision des risques épidémiques. Jusqu'ici l'impact de ces erreurs dans des applications agrométéorologiques n'a pas été suffisamment évalué.

L'objectif escompté par notre recherche est de contribuer à l'amélioration des systèmes opérationnels d'avertissement des différentes maladies cryptogamiques affectant le blé d'hiver au sud de Belgique et au G-D de Luxembourg. L'intérêt de cette partie consiste à chercher une méthodologie d'utilisation du radar pour résoudre la problématique liée à l'hétérogénéité spatiale des précipitations. Cette méthodologie permettra d'évaluer la précision des estimations des occurrences radar en vue d'une utilisation opérationnelle dans un système de contrôle de la septoriose du blé d'hiver au G-D de Luxembourg. Les données radar utilisées pour cette étude sont celles du radar météorologique de Wideumont situé dans le sud de la Belgique (Institut Royal Météorologique de Belgique). La méthode d'analyse des scores statistiques basée sur les tableaux de contingence (Tableau I-2-1) est utilisée pour déterminer l'exactitude des estimations radar. Dans ce chapitre nous présentons la précision des estimations radar, en comparaison avec des données des stations au sol.

Cette étude a été réalisée dans le cadre de notre projet de recherche doctorale qui a pour objet l'analyse et la production de données à caractère agrométéorologique au moyen d'un radar météorologique. Elle a été réalisée en collaboration avec l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM) suite à l'installation d'un radar météorologique à Wideumont dans la province du Luxembourg. Le but de cette collaboration est d'améliorer la prévision des maladies du blé d'hiver au sud de la Belgique et au G-D de Luxembourg grâce à l'utilisation des données radar. Cette partie d'étude utilise également des données du réseau du Ministère

de l'Equipement et des Transports de la Région Wallonne (MET-SETHY). Les données du réseau pluviométrique sont collectées et validées avec la plus grande minutie par l'équipe du service de climatologie.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Données radar

Les données brutes du radar sont le résultat de scans à plusieurs angles d'élévation[1] donnant une image en trois dimensions des précipitations. Le logiciel du radar peut générer plusieurs produits. Celui utilisé dans cette étude est le Pseudo CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator). Il consiste à combiner par interpolation les données de cinq élévations pour reconstituer la situation à une altitude de 1500 mètres (Figure I-2-1). A proximité du radar, le pseudo CAPPI utilise les données de l'élévation la plus haute ; pour les régions les plus éloignées, il utilise l'élévation la plus basse qui, après une certaine distance, finit toutefois par dépasser l'altitude de 1500 mètres. L'estimation radar d'une mesure a été faite en effectuant la moyenne des neuf pixels radar[2] recouvrant la station, ce qui correspond à un carré de 1.8 kilomètre de côté (Delobbe et al., 2006).

Le balayage standard du radar de Wideumont comprend 5 angles d'élévation (Figure I-2-1), ce qui signifie qu'en chaque point de la surface terrestre couverte par le radar, la réflectivité est mesurée à 5 niveaux d'altitude (0.3º, 0.9º, 1.8º, 3.3º, 6.0º). Pour la plupart des applications ce sont les taux de précipitations en surface qui importent. Il semblerait donc raisonnable d'utiliser les données récoltées au niveau le plus bas. A courte distance, ces données récoltées à basse altitude sont malheureusement contaminées par des échos du sol, ce qui les rend inutilisables. En pratique, les données récoltées aux 5 angles d'élévation sont utilisées pour générer l'image radar à deux dimensions. La méthode utilisée est illustrée à la figure suivante :

[1] Les élévations utilisées dans cette étude sont : 0.3º, 0.9º, 1.8º, 3.3º, 6.0º (élévations du produit Pseudo CAPPI).
[2] La moyenne sur neuf pixels a pour but de réduire les erreurs dues au fait que le radar mesure les précipitations à une certaine altitude et pas au niveau du sol.

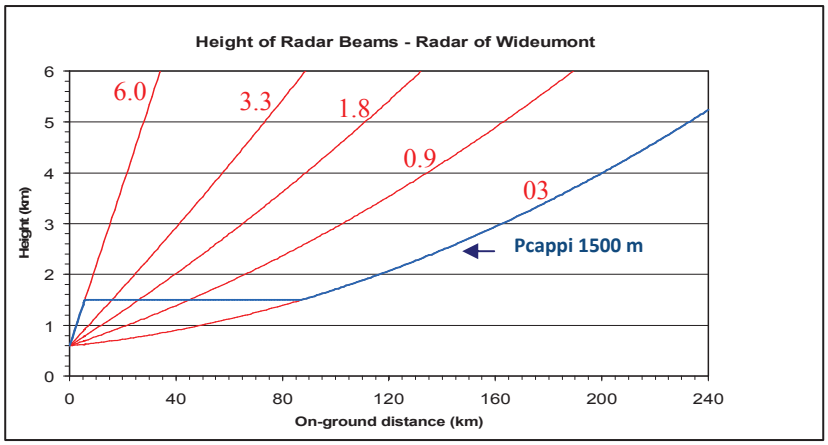


Figure I-2-1. Extraction de l'image 2D à partir des données 3D en suivant le Pseudo CAPPI à 1500m. L'altitude des 5 faisceaux radar aux différentes élévations est représentée en fonction de la distance. L'image à 2 dimensions générée à partir des données 3D est le Pseudo CAPPI. Cette image représente une tranche d'atmosphère à une altitude donnée. Cette altitude a été fixée à 1500 m pour le radar de Wideumont (Source IRM).

2.2. Données des stations pluviométriques

Les précipitations horaires utilisées dans ce travail sont extraites des données pluviométriques des stations automatiques du Ministère Wallon de l'Equipement et des Transports de Belgique (MET-SETHY) (Figure I-2-2). Le contrôle de qualité de ces données est assuré par l'IRM. Ces données ont été jugées de très bonne qualité et sont utilisées dans des études de validation à l'IRM (Dehem et Tricot, 2002) et dans des applications hydrologiques (Berne et al., 2005; Delobbe et al., 2006).

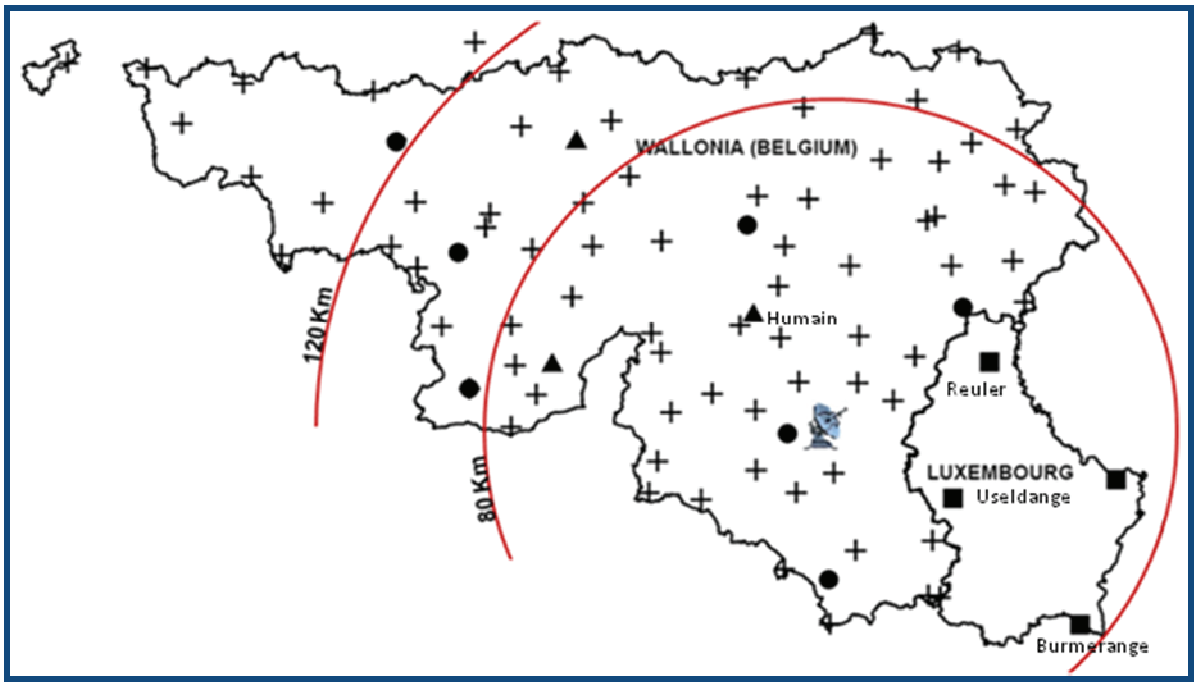


Figure I-2-2. Réseaux des stations pluviométriques automatiques du Ministère de l'Equipement et des Transports de la Région Wallonne (MET-SETHY) (+), de la Promotion Agrométéorologique au Sud-Est de la Belgique (PAMESEB) (•), de l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM) (▀) et de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) (∟). Les cercles indiquent les portées à 80 et 120 km du radar météorologique de Wideumont (◙).
Location of the RMI weather radar (◙), the 77 SETHY automatic stations (+), the seven PAMESEB agrometeorological stations (•), the four automatic stations in Luxembourg (∟) and the three RMI automatic stations (▀). The circles represent the range of the weather radar.

2.3. Base de données

Une partie du travail, de nature informatique, a consisté à intégrer les données radar dans le système de gestion de base de données Oracle.

Afin de mieux en assurer la gestion, les données de précipitations horaires récoltées au niveau des stations météorologiques et les données extraites des images radar ont été intégrées dans la base de données de l'IRM.

2.4. La méthodologie d'analyse des données

Les différentes sources d'erreurs qui affectent les estimations des précipitations radar ont été décrites dans le chapitre précédent. Vu les incertitudes qui pèsent sur ces estimations, il est important de valider les observations radar. Malgré les différentes techniques qui ont été développées pour réduire les erreurs de mesures radar, ces dernières restent souvent significatives, ce qui rend donc impossible l'évaluation précise des précipitations. Le but de cette partie du travail est de déterminer un seuil d'occurrence pour les estimations radar c'est-à-dire à partir de quelle valeur d'un pixel on peut considérer qu'il y a des précipitations effectives au sol. Notre méthodologie consiste donc à analyser les événements de

précipitations survenus entre mars et juillet[3] de 2003, 2004 et 2005 de 77 stations pluviométriques automatiques situées à différentes distances du radar (Figure I-2-1). La validation a été faite par comparaison des cumuls mensuels (analyse quantitative) et des occurrences des cumuls horaires (analyse qualitative) calculés à partir des images instantanées générées chaque 5 min[4]. Dans cette partie, nous décrivons d'abord, en bref, la validation quantitative des cumuls mensuels puis nous présentons la procédure et la méthode de vérification des scores basée sur les tableaux de contingence. Enfin, nous donnons les résultats de cette analyse.

La validation des données radar se fait généralement par comparaison des estimations de précipitations radar avec celles observées par les pluviomètres au sol. La validation quantitative consiste à déterminer le rapport R/G (R/G = radar/pluvio [gauge en anglais]) en calculant le cumul mensuel des estimations radar (R) rapporté à celui mesuré au niveau des stations au sol (G). La validation a été faite sur des stations pluviométriques automatiques du Ministère de l'Equipement et des Transports de la Région Wallonne (MET-SETHY). Il s'agit pour la plupart de pluviomètres à auget basculant. La figure I-2-2 montre la carte du réseau pluviométrique automatique du MET-SETHY et la distance de chaque station au radar. Les données récoltées subissent un contrôle de qualité avant d'être intégrées dans la base de données de l'IRM. Trois années de données ont été traitées dans le cadre de cette étude. La validation vise à évaluer la qualité des estimations de précipitations radar. Dans cette étude, on se limite à la validation des cumuls mensuels des données. Elle a pour objectif d'évaluer dans une première approche, les erreurs qui affectent les estimations (sous/sur-estimation) des cumuls de précipitations radar par rapport aux mesures des stations au sol.

La méthode employée pour l'analyse des données d'occurrence des précipitations radar est basée sur les tableaux de contingence (Wilks, 1995). Trois indices statistiques ont été déterminés à partir de ces tableaux : La probabilité de détection (POD), la proportion des fausses alarmes (FAR) et l'index de succès critique (CSI). Ces trois scores statistiques varient entre 0 et 1.

Les événements des estimations radar et ceux mesurés au sol sont classés selon le tableau de contingence suivant (Tableau I-2-1) :

[3] The choice of this period corresponds to the growing season and life cycle of *S. tritici.*

[4] Le produit de base fourni par le radar météorologique est une image des précipitations générée en temps réel toutes les 5 minutes.

- les précipitations détectées à la fois par le radar et par les stations au sol seront classées comme Hits (H) ;
- les précipitations détectées par le radar mais ne correspondant pas aux mesures des stations au sol seront classées comme "False Alarms" (FA) ;
- les précipitations qui ne sont pas détectées par radar mais mesurées par les stations au sol seront classées comme "Misses" (M) ;
- lorsqu'aucun événement n'est détecté ni par radar ni par les stations au sol, les précipitations seront classées comme des "Null" (N).

La probabilité de détection (POD) et la proportion des fausses alarmes (FAR) sont utilisées ensemble pour caractériser les résultats de vérification où la méthode avec un POD plus élevé et un FAR plus faible est meilleure, tandis que l'index de succès critique (CSI) peut être utilisé seul pour caractériser les résultats de vérification. Si les valeurs de CSI sont élevées (proche de 1) la méthode d'estimation est bonne.

Tableau I-2-1. Tableau de contingence.
2x2 contingency table.

			Measured (Rain Gauge)	
			Yes	No
Estimated (Radar)		Yes	Hits (H)	False alarms (FA)
		No	Misses (M)	Null (N)

Les équations qui déterminent POD, FAR et CSI sont :

$$POD = \frac{H}{H + M}$$ (Varie de 0 à 1, meilleur score = 1) ;

$$FAR = \frac{FA}{H + FA}$$ (Varie de 0 à 1, meilleur score = 0) ;

$$CSI = \frac{H}{H + M + FA}$$ (Varie de 0 à 1, meilleur score = 1).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Validation des cumuls mensuels de précipitations radar

Les cumuls mensuels sont calculés par la somme des cumuls horaires (les cumuls horaires sont générés par simple sommation des mesures réalisées toutes les 5 minutes). Pour chaque station au sol, le cumul radar est estimé en prenant la moyenne des 9 pixels les plus proches

de la station (Delobbe et al., 2006). Le rapport R/G des cumuls mensuels radar et des cumuls mensuels pluviométriques est calculé pour chaque mois et pour chaque station (Tableau I-2-2). Une valeur supérieure à 1 signifie une surestimation des précipitations par le radar. Les résultats font apparaître que le radar a tendance à sous-estimer les précipitations. L'erreur (Bias)[(5)] calculée pour l'ensemble des stations varie entre -50% et +12% (Tableau I-2-2). En mai 2004, le radar a sous-estimé les précipitations d'environ 50%. Comme le montrent la figure I-2-3 et le tableau I-2-2, le radar peut sur-estimer les quantités de précipitations. Pour le mois de juin 2003 (Figure I-2-3), le radar a sur-estimé les précipitations de 12%. Pour le mois d'avril 2004 (Figure I-2-3), on observe une sous-estimation du radar pour la plupart des stations. Les résultats montrent également que la qualité d'estimation se dégrade avec la distance par rapport au radar (Figure I-2-3 et Annexe A) en particulier pour les précipitations stratiformes durant les mois d'hiver. La figure I-2-3 montre aussi qu'au delà d'une distance d'environ 110 km cette dégradation est rapide. A 240 km, le radar ne détecte pratiquement pas de précipitations. Ainsi, la portée effective pour une estimation quantitative des précipitations est de l'ordre de 80 à 120 km. On observe également une très grande variabilité temporelle des rapports R/G (Annexe A). Une sous-estimation des quantités de précipitations radar durant l'hiver pourrait être due à la nature stratiforme des précipitations et à la présence de neige de faible réflectivité dans le faisceau radar. Pour les stations situées loin du radar, ceci pourrait être dû au remplissage partiel du faisceau radar ou au phénomène d'"overshooting". Les comportements différents observés pour ces deux mois sont liés au type de précipitations. Les rapports R/G calculés pour toutes les stations pour les trois périodes étudiées sont représentés en annexe (voir Annexe A).

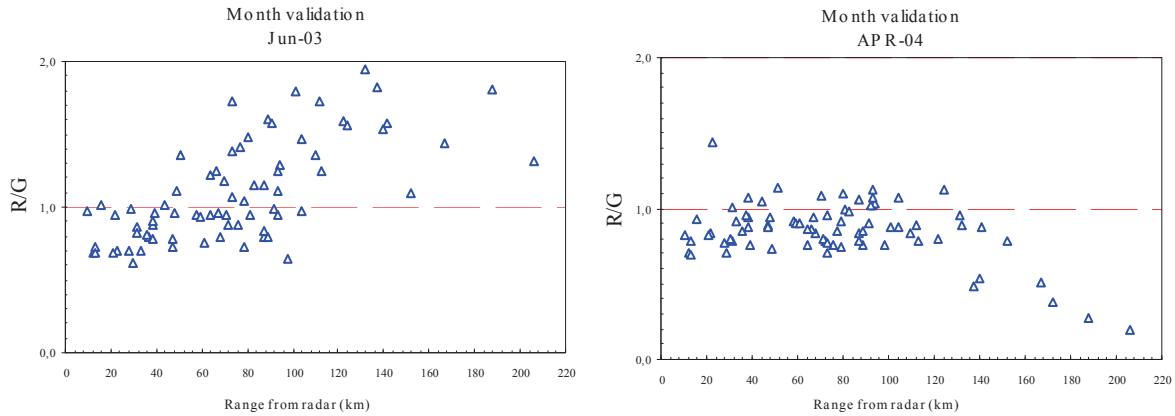


Figure I-2-3. Validation mensuelle des estimations radar pour les mois de juin 2003 et avril 2004 : rapport radar/pluvio (R/G) en fonction de la distance au radar. Chaque point (∆) représente une station. Les autres résultats sont présentés dans l'annexe (Annexe A).

[5] Bias = (Radar/Gauge – 1)×100.

Tableau I-2-2. Comparaison entre les épisodes pluvieux mensuels calculés soit à partir du radar météorologique de l'IRM, soit à partit des 77 stations pluviométriques du SETHY, sur trois saisons culturales en 2003, 2004 et 2005. POD, FAR et CSI ont été calculés à partir de données horaires et moyennisées par mois.
Comparison between monthly rainfall events calculated from cumulative hourly data estimated by the RMI weather radar against measurements made by 77 SETHY rain gauges, over three cropping seasons in 2003, 2004 and 2005. The verification measurements POD, FAR and CSI were calculated at hourly time steps and averaged per month.

2003	**Bias***	**POD**	**FAR**	**CSI**	**Events**
March	-13.90	0.67	0.35	0.49	54775
April	-9.43	0.74	0.37	0.52	54402
May	-7.79	0.80	0.28	0.61	53260
June	12.24	0.69	0.39	0.47	54272
July	-25.16	0.78	0.28	0.60	55588
All	-8.81	0.74	0.34	0.54	274300
2004					
March	-33.60	0.57	0.40	0.41	55499
April	-12.57	0.74	0.27	0.58	53592
May	-50.45	0.70	0.26	0.56	57211
June	6.70	0.79	0.33	0.56	55363
July	-19.27	0.79	0.33	0.56	52668
All	-21.84	0.72	0.32	0.53	276337
2005					
March	-42.68	0.44	0.44	0.32	56955
April	-12.25	0.68	0.28	0.53	51667
May	-15.57	0.73	0.24	0.60	49049
June	-16.33	0.74	0.32	0.55	54945
July	-35.59	0.73	0.21	0.61	54898
All	-24.48	0.66	0.30	0.52	269519

* Percent Bias error was calculated by Bias = (Radar/Gauge – 1)×100.

POD: Probability Of Detection; FAR: False Alarm Ratio; CSI: Critical Success Index.

L'analyse du profil vertical de la réflectivité[6] pour deux épisodes pluvieux (Berne et al., 2005; Delobbe, 2006; Delobbe et al., 2006) montre une différence entre les précipitations stratiformes et convectives :

- les situations de pluies stratiformes caractérisées par des champs de précipitations de grande extension horizontale, de faible extension verticale et par une faible variabilité spatiale et temporelle des intensités de pluie ;

[6] Caractères non uniformes de la répartition verticale des précipitations. La réflectivité radar sur la verticale varie car la distribution granulométrique, la densité, la vitesse de chute et les propriétés des hydrométéores changent avec l'altitude. L'effet de bande brillante est lié à ces variations.

- Les situations de pluies convectives caractérisées par des champs de précipitations de plus grande extension verticale et par une forte variabilité spatiale et temporelle des intensités de pluie.

Dans la première situation le radar a tendance à sous-estimer les précipitations alors que dans la deuxième le radar sur-estime les précipitations.

La mauvaise adéquation entre les paramètres a et b de la relation (Z-R)[7] (Steiner et al., 1995), l'écho du sol, l'atténuation (Hannesen, 2001) et l'overshooting (Harrison et al., 2000) sont à l'origine des sous-estimations et sur-estimations des quantités de précipitations. Le profil vertical de réflectivité constitue à lui seul une importante source d'erreurs (Andrieu et al., 1997; Creutin et al., 1997). Le phénomène de la bande brillante est plus accentué pour des précipitations de type stratiforme que pour des précipitations de type convectif. L'effet de la bande brillante disparaît graduellement avec la distance par rapport au radar (Berne et al., 2005; Delobbe et al., 2006).

En ce qui concerne l'atténuation, les radars opérationnels de type bande C tels que le radar de Wideumont sont connus pour être sensibles à l'atténuation même à des taux modérés de pluie. En outre, l'atténuation engendrée par l'eau de pluie présente sur le radôme (le dôme protecteur couvrant l'antenne de radar) pose de sérieux problèmes dans la majorité des cas. Le développement des méthodes précises pour la correction due à ces erreurs demeure toujours l'objectif majeur de plusieurs recherches (Berne et Uijlenhoet, 2004).

[7] Il reste aujourd'hui encore des incertitudes dans l'estimation de la pluie par radar car les relations entre le facteur de réflectivité radar Z et le taux de précipitations R reposent sur des hypothèses concernant la distribution granulométrique des gouttes dont la variabilité est encore aujourd'hui mal connue. Une solution consiste à choisir la relation Z-R la plus appropriée en fonction du type de pluie rencontrée (Austin, 1987). Cependant, il ne semble pas s'agir d'une source d'erreur déterminante (Zawadzki, 1984).

3.2. Méthode d'estimation de la précision de la mesure radar pour le suivi de l'occurrence des pluies

Le radar est un système fortement efficace. Il convient cependant d'étudier les limites de fonctionnement acceptable de l'instrument selon le type d'application. Dans le cas des applications agrométéorologiques pour lesquelles la connaissance de la présence et/ou l'absence de la pluie est d'une importance primordiale pour le déclenchement des cycles de maladie des plantes, nous devons nous intéresser exclusivement à l'aptitude du radar à signaler des occurrences de précipitations. Nous ne travaillons donc pas sur les potentialités du radar à déterminer des volumes de précipitations. Malgré les différentes techniques qui ont été développées pour réduire les erreurs de mesures radar, ces dernières restent encore souvent significatives, et elles vont compliquer l'analyse. Le but de cette partie du travail est de déterminer un seuil minimum de précipitations estimé par le radar au-dessus duquel les occurrences réelles de précipitations sont très probables. L'analyse des trois scores statistiques POD, FAR et CSI a été réalisée pour chaque station et pour chaque période étudiée en fonction de la distance.

De la même manière que pour l'analyse quantitative présentée juste avant, nous avons calculé pour chaque station les valeurs de POD, FAR et de CSI. La figure suivante (Figure I-2-4) donne les valeurs de trois scores calculés par rapport au radar pour la période de mai 2003. Les valeurs de ces scores calculés pour chaque mois et pour l'ensemble des stations sont présentées dans le tableau 2 (Tableau I-2-2). Les résultats d'autres périodes sont présentés en annexe (Annexe B). Les indices calculés à partir de la méthode de vérification des scores basée sur les tableaux de contingence donnent des valeurs de POD comprises entre 0.44 et 0.80 (Tableau I-2-2) durant la période étudiée. La valeur moyenne calculée pour l'ensemble des stations est de 0.70. Les valeurs de FAR sont comprises entre 0.21 et 0.44 pour une valeur moyenne sur toute la période étudiée de 0.33 (Tableau I-2-2).

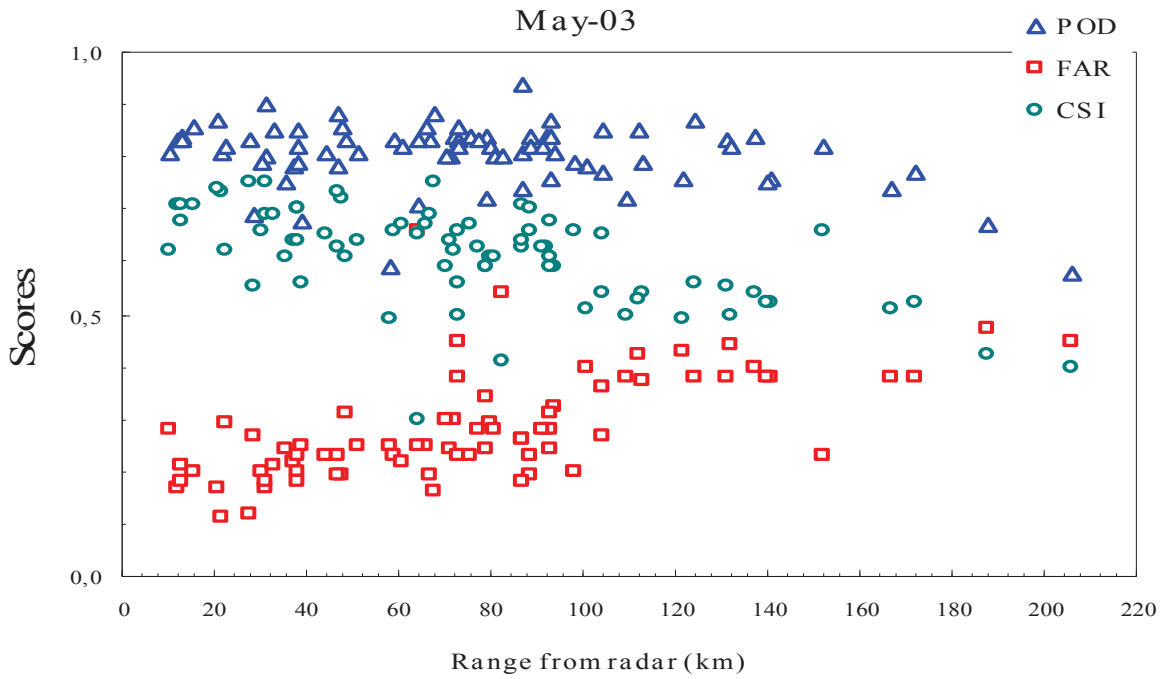


Figure I-2-4. Valeurs de POD, FAR et CSI calculées pour chaque station en comparant les occurrences de précipitations horaires mésurées avec des pluviomètres aux estimations provenant du radar de l'IRM selon la distance par rapport au radar. Les résultats pour d'autres périodes sont présentés dans l'annexe (Annexe A).
Values of POD, FAR and CSI calculated for each station by comparing hourly precipitation measured by the rain-gauges with rainfall events estimated by the RMI-radar at different ranges from radar.

L'analyse des résultats a mis en évidence deux types d'erreurs en comparant les occurrences de précipitations estimées par le radar avec celles observées au niveau des stations au sol : les erreurs d'omission ("Misses"), c'est-à-dire, celles pour lesquelles on observe la pluie au sol alors qu'elle n'est pas détectée par le radar, et les erreurs par excès ("Falses Alarms") c'est-à-dire, celles pour lesquelles le radar signale de la pluie alors qu'elle n'est pas observée au sol au niveau des stations pluviométriques. Pour mieux connaître à quelle catégorie de précipitations sont attribuées ces erreurs et aussi pour savoir à partir de quel seuil de précipitations minimum on a une bonne estimation des occurrences de précipitations radar, on a essayé de déterminer les tableaux de contingences des estimations d'occurrences des précipitations radar en relation avec celles des stations MET-SETHY en fonction de chaque catégorie de précipitations horaires : respectivement les catégories]0-0.1],]0.1-0.2],]0.2-0.3],]0.3-0.4],]0.4-0.5],]0.5-1],]1-2] et plus que 2 mm ont été déterminées. Le tableau 3 (Tableau I-2-3) donne les résultats des tableaux de contingence calculés pour toutes les stations durant trois saisons culturales 2003, 2004 et 2005. Les valeurs en bleu présentent les erreurs d'omission et les valeurs en rouge indiquent les erreurs par excès. Les succès du radar sont représentés par les valeurs en bleu.

Tableau I-2-3. Tableau de contingence (en %) des estimations d'occurrences horaires de précipitations radar (R) et celles des stations MET-SETHY (G) calculé pour toutes les stations durant trois saisons culturales (2003, 2004 et 2005). Les valeurs en bleu représentent les précipitations détectées à la fois par le radar et par les stations au sol ("Hits"), les valeurs en rouge signifient les précipitations détectées par le radar mais ne correspondant pas aux mesures des stations au sol ("False alarms") et les valeurs vertes indiquent les précipitations qui ne sont pas détectées par le radar mais mesurées par les stations au sol ("Misses").
Hourly precipitation contingency tables (in %) for both the SETHY rain gauge network (G) and RMI weather radar (R) from March 1 to July 31 in 2003, 2004 and 2005 for all stations. The blue values represent precipitation both detected by radar and measured by rain gauges (hits), the red values signify precipitation measured by rain gauges but not detected by radar (False alarms) and the green values indicate the rainfall not measured by rain gauges but estimated by radar (Misses).

Years	R \ G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2
2003	0	86.42	**1.74**	0.27	0.15	0.07	0.05	0.09	0.07	0.09
	]0-0.1]	**2.36**	0.64	0.24	0.14	0.07	0.05	0.11	0.04	0.01
	]0.1-0.2]	0.57	0.32	0.18	0.11	0.08	0.05	0.12	0.05	0.01
	]0.2-0.3]	0.26	0.18	0.14	0.11	0.07	0.05	0.12	0.06	0.01
	]0.3-0.4]	0.10	0.09	0.10	0.09	0.07	0.05	0.12	0.07	0.01
	]0.4-0.5]	0.08	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04	0.11	0.07	0.02
	]0.5-1]	0.13	0.07	0.10	0.11	0.13	0.11	0.46	0.36	0.10
	]1-2]	0.09	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.24	0.50	0.34
	>0.2	0.04	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.04	0.16	0.55
2004	0	83.76	**2.38**	0.48	0.21	0.13	0.08	0.17	0.09	0.08
	]0-0.1]	**2.67**	0.82	0.36	0.21	0.12	0.07	0.18	0.05	0.01
	]0.1-0.2]	0.64	0.41	0.23	0.16	0.11	0.07	0.19	0.07	0.02
	]0.2-0.3]	0.27	0.21	0.18	0.12	0.09	0.06	0.18	0.07	0.03
	]0.3-0.4]	0.14	0.10	0.10	0.08	0.07	0.06	0.15	0.09	0.02
	]0.4-0.5]	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.15	0.09	0.03
	]0.5-1]	0.14	0.09	0.10	0.12	0.13	0.13	0.49	0.40	0.19
	]1-2]	0.06	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.25	0.41	0.30
	>0.2	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.13	0.46
2005	0	83.28	**2.88**	0.68	0.36	0.21	0.13	0.25	0.10	0.05
	]0-0.1]	**2.38**	0.86	0.43	0.22	0.16	0.11	0.20	0.06	0.01
	]0.1-0.2]	0.55	0.38	0.24	0.17	0.12	0.08	0.18	0.07	0.01
	]0.2-0.3]	0.22	0.18	0.16	0.13	0.11	0.07	0.20	0.08	0.01
	]0.3-0.4]	0.09	0.09	0.10	0.08	0.08	0.06	0.18	0.08	0.01
	]0.4-0.5]	0.06	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.18	0.09	0.02
	]0.5-1]	0.10	0.05	0.06	0.09	0.10	0.11	0.51	0.44	0.11
	]1-2]	0.05	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.21	0.42	0.30
	>0.2	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.11	0.47

R: Radar, G: Raingauge

L'analyse de ces résultats montre que la très grosse majorité des erreurs se retrouve dans les pluies de faibles quantités (quantités de précipitations ≥ 0.2 mm). Par exemple pour le mois de juin 2004 (Tableau I-2-4), 3.16/4.94 des erreurs de "False Alarms" sont dues aux précipitations de catégorie 0-0.1 mm et plus de 1.92/2.68 d'erreur de "Misses" sont dues à des précipitations de 0-0.1 mm. Les résultats des autres périodes sont présentés en annexe (Annexe C).

Tableau I-2-4. Tableau de contingence (en %) des estimations d'occurrences horaires des précipitations radar (R) et celles des stations MET-SETHY (G) calculé pour toutes les stations durant le mois de juin 2004. Les valeurs en bleu représentent les précipitations détectées à la fois par le radar et par les stations au sol ("Hits"), les valeurs en rouge signifient les précipitations détectées par le radar mais ne correspondant pas aux mesures des stations au sol ("False alarms") et les valeurs vertes indiquent les précipitations qui ne sont pas détectées par le radar mais mesurées par les stations au sol ("Misses").
Contingency tables for both the MET-SETHY (G) and radar derived precipitation (R) fields from 1st June to 30th June 2004. The blue values represent precipitation both detected by radar and measured by rain gauges (hits), the red values signify precipitation measured by rain gauges but not detected by radar (False alarms) and the green values indicate the rainfall not measured by rain gauges but estimated by radar (Misses).

R \ G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Miss
0	82,38	1,92	0,29	0,14	0,08	0,04	0,12	0,07	0,02	85,06	**2,68**
]0-0.1]	3,16	1,01	0,33	0,18	0,09	0,05	0,12	0,03	0,00	4,97	
]0.1-0.2]	0,82	0,59	0,27	0,13	0,08	0,06	0,13	0,06	0,01	2,15	
]0.2-0.3]	0,37	0,34	0,24	0,12	0,08	0,06	0,10	0,03	0,01	1,36	
]0.3-0.4]	0,19	0,12	0,17	0,12	0,10	0,06	0,13	0,06	0,01	0,95	
]0.4-0.5]	0,09	0,09	0,11	0,11	0,09	0,07	0,13	0,05	0,01	0,75	
]0.5-1]	0,20	0,12	0,15	0,18	0,22	0,18	0,68	0,35	0,08	2,16	
]1-2]	0,09	0,03	0,02	0,02	0,05	0,09	0,38	0,65	0,29	1,63	
>0.2	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,21	0,61	0,96	
Total	87,32	4,23	1,60	1,00	0,79	0,62	1,88	1,51	1,06	100	**10**
FA	**4,94**										

On remarque également que le radar a tendance à mieux estimer les occurrences de précipitations à partir d'un certain seuil. Dans notre cas, un seuil au-delà de 0.1 mm (on considère qu'il pleut dès que les précipitations horaires atteignent la classe]0.1-0.2 mm]) semble bien améliorer la précision des estimations des occurrences radar. La figure suivante (Figure I-2-5) montre l'ajustement des données en fixant ce nouveau seuil de précipitations pour chaque mois et pour trois années testées durant cette étude (2003, 2004 et 2005). Les résultats montrent une amélioration considérable des valeurs de scores de vérification. Les valeurs de POD', FAR' et CSI' ont été calculées en considérant seulement les heures où les quantités de précipitations radar et pluviométrique dépassent toutes les deux 0.1 mm. En d'autres termes, une occurrence de pluie sera notée dès que le radar et le pluviomètre auront enregistré plus de 0.1 mm/heure.

Les variations spatiale et temporelle de l'erreur d'occurrence sont en général moins dépendantes de la distance des stations par rapport au radar que l'erreur quantitative sur les volumes de précipitations (Annexe B).

Pour terminer, une quantification des erreurs de mesure des stations pluviométriques utilisées comme référence dans toute étude de calibration et de validation des données radar, s'avère indispensable. Cette référence est toujours considérée par plusieurs chercheurs comme une vérité dite vérité au sol ("ground truth"). Pourtant cette référence peut aussi faire l'objet d'erreurs (Groisman et Legates, 1994).

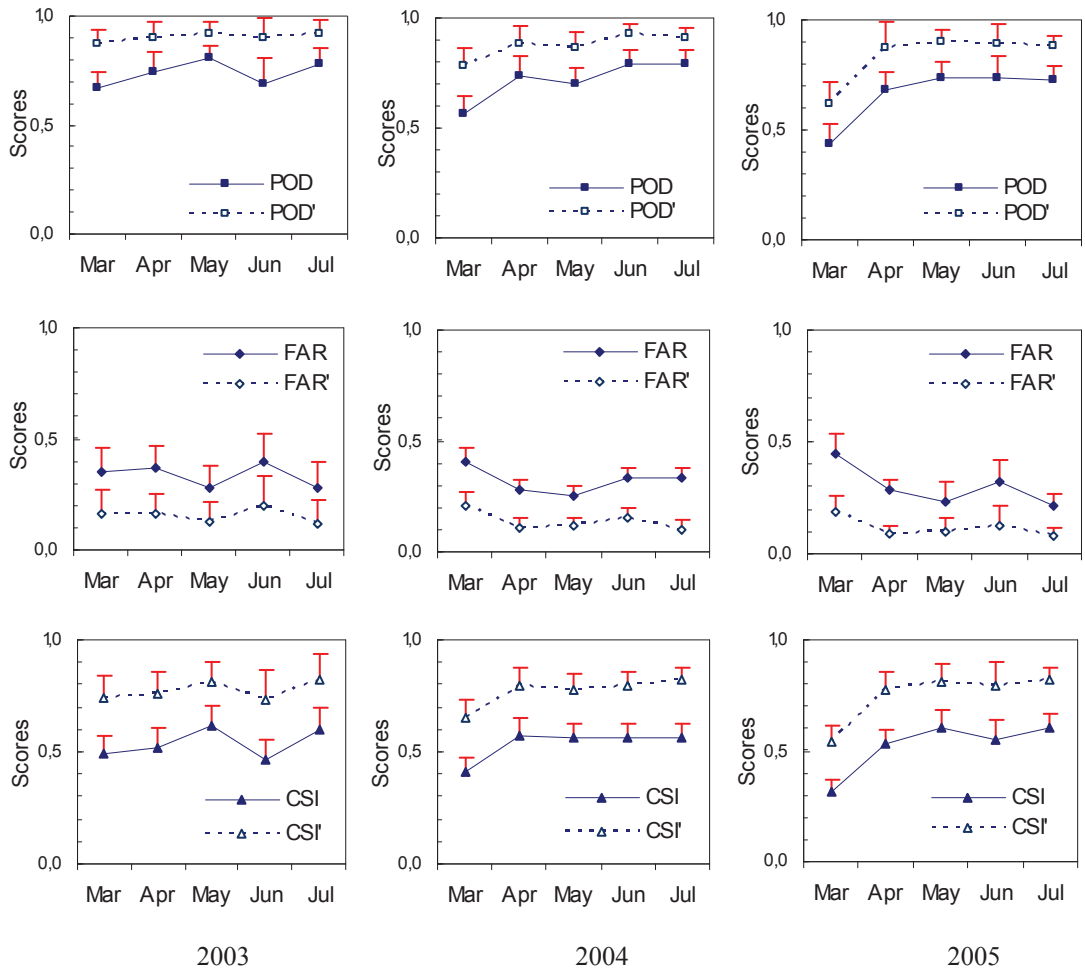


Figure I-2-5. Ajustement des valeurs des scores de vérification (POD, POD' ; FAR, FAR' ; CSI, CSI'). Les valeurs de POD', FAR' et CSI' ont été calculées en considérant comme épisode pluvieux seulement les heures où les précipitations dépassent 0.1 mm.
Adjusted verification scores. The POD´, FAR´ and CSI´ are the adjusted POD, FAR and CSI values, respectively, obtained when raising the minimum rainfall threshold. The values of POD', FAR' and CSI' have been calculated by considering only hours when the RMI-Radar rainfall estimates and SETHY-rain-gauge precipitation measurements exceeding both 0.1 mm.

La présence importante d'erreurs de "Misses" pendant certaines périodes nous conduit à poser la question sur la précision fournie par les mesures pluviométriques des stations météo, particulièrement pour les petites quantités de précipitations et cela malgré toute la rigueur sur les contrôles de qualité des données. La mesure par les pluviomètres peut constituer une source potentielle d'erreur en particulier pour les faibles quantités de précipitations. Par exemple le vent près du sol, les pertes par l'humidification des parois internes des pluviomètres ("undercatch") (Groisman et Legates, 1994) peuvent parfois empêcher les gouttes de pluie d'arriver jusqu'à l'auget basculeur qui enregistre les précipitations lors de son basculement. La précision des pluviomètres est de 0.1 mm et est liée au degré de remplissage des augets au commencement d'un épisode pluvieux (vide, à moitié plein ou quasi rempli).

L'erreur peut également être due au mauvais fonctionnement mécanique du pluviomètre ou à l'encrassement biologique (Steiner et al., 1999). L'erreur pour les stations au sol est généralement entre 5 et 10% (Sauvageot, 1994).

Connaissant les limites de notre instrument de référence (pluviomètre) nous avons tenté l'utilisation du radar météorologique de Wideumont pour évaluer le développement des maladies dans les parcelles de blé d'hiver au G-D de Luxembourg et au sud de la Belgique.

4. CONCLUSIONS

- La validation des données radar par les données pluviométriques a été réalisée sur trois périodes de croissance. Les résultats font apparaître que le radar a souvent tendance à sous-estimer les volumes de précipitations. La qualité des estimations radar se dégrade à mesure que l'on s'éloigne du radar.

- La validation des données radar par les stations au sol doit être soigneusement faite en raison de la nature différente des mesures radar et pluviométriques ; les données radar sont des mesures instantanées de volume de précipitations sur une zone de plus ou moins un kilomètre carré et la mesure de pluie par les stations au sol est une mesure ponctuelle (quelques cm^2) de précipitations cumulée sur le pas de temps choisi.

- La méthode de vérification des scores statistiques peut être un bon moyen pour l'analyse et le diagnostic des erreurs radar (fausses alertes et "Misses"). Une analyse des données via cette méthode permet de connaître les sources d'erreurs et d'estimer leur ampleur. Si l'on dispose d'une historique de données radar, elle permet en outre de connaître préalablement, avant toute utilisation, la précision et la fiabilité des données.

- Les résultats de l'analyse des tableaux de contingence en fonction des classes de précipitations ont été déterminés et les scores de vérification POD, CSI et FAR ont été représentés pour la période étudiée. Le comportement de ces trois scores montre que la précision de la mesure des données radar dépend de la période et de la distance par rapport au radar.

- L'existence d'erreur d'omission ("Misses") nous fait poser la question sur la précision fournie par les mesures pluviométriques au sol ("vérité au sol") surtout pour les quantités de précipitations faibles.

- En dépit des limites de précision des mesures des données radar mentionnées plus haut, ce dernier demeure un bon moyen pour une meilleure description spatiale des précipitations.

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Tableaux :

Tableau I-2-1. Tableau de contingence. 54
Tableau I-2-2. Comparaison entre les épisodes pluvieux mensuels calculés soit à partir du radar météorologique de l'IRM, soit à partit des 77 stations pluviométriques du SETHY, sur trois saisons culturales en 2003, 2004 et 2005. POD, FAR et CSI ont été calculés à partir de données horaires et moyennisées par mois. 56
Tableau I-2-3. Tableau de contingence (en %) des estimations d'occurrences horaires de précipitations radar (R) et celles des stations MET-SETHY (G) calculé pour toutes les stations durant trois saisons culturales (2003, 2004 et 2005). Les valeurs en bleu représentent les précipitations détectées à la fois par le radar et par les stations au sol (hits), les valeurs en rouge signifient les précipitations détectées par le radar mais ne correspondant pas aux mesures des stations au sol ("False alarms") et les valeurs vertes indiquent les précipitations qui ne sont pas détectées par le radar mais mesurées par les stations au sol ("Misses"). 60
Tableau I-2-4. Tableau de contingence (en %) des estimations d'occurrences horaires des précipitations radar (R) et celles des stations MET-SETHY (G) calculé pour toutes les stations durant le mois de juin 2004. Les valeurs en bleu représentent les précipitations détectées à la fois par le radar et par les stations au sol (hits), les valeurs en rouge signifient les précipitations détectées par le radar mais ne correspondant pas aux mesures des stations au sol ("False alarms") et les valeurs vertes indiquent les précipitations qui ne sont pas détectées par le radar mais mesurées par les stations au sol ("Misses"). 61

Figures :

Figure I-2-1. Extraction de l'image 2D à partir des données 3D en suivant le Pseudo CAPPI à 1500m. L'altitude des 5 faisceaux radar aux différentes élévations est représentée en fonction de la distance. L'image à 2 dimensions générée à partir des données 3D est le Pseudo CAPPI. Cette image représente une tranche d'atmosphère à une altitude donnée. Cette altitude a été fixée à 1500 m pour le radar de Wideumont (Source IRM)..... 51
Figure I-2-2. Réseaux des stations pluviométriques automatiques du Ministère de l'Equipement et des Transports de la Région Wallonne (MET-SETHY) **(+)**, de la Promotion Agrométéorologique au Sud-Est de la Belgique (PAMESEB) (•), de l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM) (▀) et de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) (∟). Les cercles indiquent les portées à 80 et 120 km du radar météorologique de Wideumont (▀)..... 52
Figure I-2-3. Validation mensuelle pour les mois de juin 2003 et avril 2004 : rapport radar/pluvio (R/G) en fonction de la distance au radar. Chaque point (Δ) représente une station. Les autres résultats sont présentés dans l'annexe (Annexe A). 55
Figure I-2-4. Valeurs de POD, FAR et CSI calculées pour chaque station en comparant les occurrences de précipitations horaires mesurées avec des pluviomètres aux estimations provenant du radar de l'IRM selon la distance par rapport au radar. Les résultats pour d'autres périodes sont présentés dans l'annexe (Annexe A)..... 59
Figure I-2-5. Ajustement des valeurs des scores de vérification (POD, POD' ; FAR, FAR' ; CSI, CSI'). Les valeurs de POD', FAR' et CSI' ont été calculées en considérant seulement les heures où les précipitations dépassent 0.1 mm. 62

RÉFÉRENCES

Andrieu, H., Creutin, J. D., Delrieu, G., and Faure, D. (1997). Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part I: radar measurement interpretation. *Journal of Hydrology* **193**, 1-25.

Atlas, D. (1990). Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology ConferenceCode RADMET. Publié par l'American Meteorological Society , Boston , 1990 , 806 pages, ISBN 0-933876-86-6, AMS.

Atlas, D., Rosenfield, D., and Jameson, A. R. (1997). Evolution of radar rainfall measurement: Steps and mis-steps. In Weather Radar Technology for Water Resources Management, B. Braga and O. Massambani, UNESCO Press, Montevideo, 1-60.

Berne, A., ten Heggeler, M., Uijlenhoet, R., Delobbe, L., Dierickx, P., and de Wit, M.

(2005). A preliminary investigation of radar rainfall estimation in the Ardennes region and a first hydrological application for the Ourthe catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **5**, 267-274.

Berne, A., and Uijlenhoet, R. (2004). Analysis of the influence of the stochastic variability of the raindrop size distribution on radar attenuation correction. *Proc. ERAD* 341-346.

Collier, C. G., and Lilley, R. B. E. (1994). Forecasting thunderstorm initiation in north-west Europe using thermodynamic indices, satellite and radar data. *Meteorological Applications* **1**, 75-84.

Creutin, J. D., Andrieu, H., and Faure, D. (1997). Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area, Part II: Radar measurement interpretation. *Journal of Hydrology* **193**, 26-44.

Dehem, D., and Tricot, C. (2002). "Etude d'une méthodologie de contrôle de qualité de données pluviométriques". Cahier spécial des charges MS/212/2001/04. *Rapport trimestriel d'état d'avancement (No 3) mai 2002 à juillet 2002*.

Delobbe, L. (2006). Estimation des précipitations à l'aide d'un radar météorologique. Royal Meteorological Institute, Brussels, Belgium (see also http://www.kmi.be/).

Delobbe, L., Dehem, D., Dierickx, P., Roulin, E., Thunus, M., and Tricot, C. (2006). Combined use of radar and gauge observations for hydrological applications in the Walloon region of Belgium. *In* "Fourth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology", Barcelona, Spain.

Gillespie, T. J., and Sentelhas, P. C. (2008). Agrometeorology and plant disease management - a happy marriage. *Scientia Agricola* **65**, 71-75.

Groisman, P. Y., and Legates, D. R. (1994). The accuracy of United-States precipitation data *Bulletin of the American Meteorological Society* **75**, 215-227.

Hannesen, R. (2001). Quantitative precipitation estimation from radar data : a review of current methodology. *MUSIC Project. European commission*.

Harrison, D. L., Driscoll, S. J., and Kitchen, M. (2000). Improving precipitation estimates from weather radar using quality control and correction techniques. *Meteorological Applications* **7**, 135-144.

Joss, J., and Waldvogel, A. (1990). Precipitation measurement and hydrology. Chapter 29a, Radar in meteorology. Battan memorial and fortieth anniversary radar meteorology conference (Atlas. D, ed). *Boston, American Meteorological society* 577-606.

Ryzhkov, A. V., Zrnic, D. S., and Gordon, B. A. (1998). Polarimetric method for ice water content determination. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 125-134.

Sauvageot, H. (1994). Rainfall measurement by radar - a review. *Atmospheric Research* **35**, 27-54.

Steiner, M., Houze, R. A., and Yuter, S. E. (1995). Climatological characterization of 3-dimensional storm structure from operational radar and rain-gauge data. *J. Appl. Meteorol.* **34**, 1978-2007.

Steiner, M., Smith, J. A., Burges, S. J., Alonso, C. V., and Darden, R. W. (1999). Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation. *Water Resources Research* **35**, 2487-2503.

Wilks, D. S. (1995). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences *Academic press, San Diego, CA*.

Workneh, F., Narasimhan, B., Srinivasan, R., and Rush, C. A. (2005). Potential of radar-estimated rainfall for plant disease risk forecast. *Phytopathology* **95**, 25-27.

PARTIE I

Chapitre 3

Validation des estimations de précipitations radar pour des applications agrométéorologiques : cas de contrôle des périodes d'infection de *Septoria tritici*

RÉSUMÉ

Les mesures radar sont moins précises que les mesures de précipitations par des pluviomètres. Néanmoins, le radar permet d'observer en temps réel les précipitations sur un large domaine avec une très bonne résolution spatiale et temporelle. L'objectif de cette partie est d'étudier les potentialités du radar météorologique de Wideumont à simuler les périodes d'infection de Septoria tritici au G-D de Luxembourg et au sud de la Belgique. L'impact des estimations radar sur les périodes d'infection simulées par PROCULTURE a été évalué durant trois saisons culturales (2003, 2004 et 2005) par comparaison entre les données de sortie du modèle ayant en données d'entrée, soit les estimations de précipitations radar, soit celles mesurées par les stations au sol. Les estimations visuelles sur des sites d'essai de développement des symptômes de la maladie sur les trois dernières feuilles ont constitué les références qui ont servi pour cette comparaison. Cette partie a été réalisée grâce à l'utilisation des données du réseau du MET-SETHY, de l'IRM, de l'ASTA et de PAMESEB.

Les résultats de cette étude montrent bien les potentialités et les avantages d'utilisation du système radar dans des applications agrométéorologiques notamment pour la prévision des périodes d'infection des maladies du blé d'hiver. Le radar météorologique devrait être bénéfique pour des régions où le réseau des stations pluviométriques est moins dense ou inexistant et où l'incidence de la septoriose est importante.

Mots clés: *Radar météorologique, Septoria tritici, PROCULTURE, Station agrométéorologique, Prévision épidémique, Blé d'hiver, Spatialisation.*

1. INTRODUCTION

La pluie est le facteur météorologique le plus variable dans l'espace (Hubbard, 1994; Krajewski et al., 2003). Elle exerce, en terme de durée ou d'occurrence, une influence déterminante sur le développement des maladies (Pietravalle et al., 2003). Ce paramètre est une information essentielle en agriculture et notamment pour le développement des systèmes opérationnels de prévision des risques épidémiques, puisque beaucoup de modèles développés pour l'évaluation de la durée d'humectation des feuilles et les maladies des plantes dépendent de la durée et/ou de l'occurrence de précipitations (Hoppmann et Wittich, 1997).

Le plus souvent, les données de précipitations proviennent des observations de pluviomètres faisant partie d'un réseau qui ne représente qu'une surface extrêmement réduite du territoire à couvrir. Ces données sont interpolées par différentes techniques de spatialisation pour reconstituer le champ pluvieux. Cette opération s'avère cependant peu fiable lorsque la pluie présente une grande variabilité spatiale (Gillespie et Sentelhas, 2008; Workneh et al., 2005; Workneh et al., 2006). Des études récentes ont montré que les images radar représentent une alternative intéressante aux cartes obtenues par les méthodes d'interpolation (Cicogna et al., 2005; Rowlandson et al., 2004; Rowlandson et al., 2009). Le radar par conséquent peut être un outil intéressant pour l'obtention d'une intégration spatiale des données de précipitations.

Récemment beaucoup d'études ont montré les potentialités de l'utilisation du radar dans les applications agrométéorologiques notamment dans des systèmes de protection des plantes (Cicogna et al., 2005; Detrixhe et al., 2003; Hoppmann et Wittich, 1997; Ulbrich et Lee, 1999). Ces tentatives présentent l'utilisation des données radar comme alternative aux mesures des pluviomètres principalement pour les régions où on ne dispose que de très peu de stations. Le principal avantage de l'utilisation du radar météorologique est une description spatiale plus fine des champs de précipitations que les réseaux pluviométriques ne peuvent offrir (Sauvageot, 1994). Par conséquent, il offre d'énormes potentialités pour la prévision des maladies des plantes et pour l'évaluation des risques épidémiques à l'échelle régionale.

De nombreux efforts sont actuellement entrepris pour améliorer les estimations radar des précipitations pour des applications agrométéorologiques (Gillespie et Sentelhas, 2008; Maggi et Qinghua, 2007; Rowlandson et al., 2009; Workneh et al., 2005). La méthode la plus classique pour améliorer la qualité des cumuls des précipitations observées par le radar consiste à corriger les estimations radar à l'aide de données pluviométriques au sol. Cette méthode, dite d'ajustement aux pluviomètres (Einfalt et al., 2004; Sauvageot, 1992), peut être

implémentée de différentes manières, selon les échelles spatiales et temporelles auxquelles on applique la correction.

Au G-D de Luxembourg un modèle, nommé PROCULTURE, est utilisé pour la prévision et le contrôle des périodes d'infection de *S. tritici* dans les champs de blé d'hiver. Le système permet d'identifier les périodes d'infection en utilisant les données horaires de précipitations, de température et d'humidité relative issues des stations les plus proches des champs de blé. Basé sur les mesures de précipitations du réseau de station il n'est pas capable de suivre l'évolution des maladies du blé dans les champs éloignés de ces stations; ce qui constitue clairement l'une de ses limitations. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact d'utilisation des données radar sur la simulation des périodes d'infection de *S. tritici* par le modèle PROCULTURE.

Dans ce chapitre nous rappelons les conditions d'infection adoptées par le système de prévision du risque de septoriose PROCULTURE. Puis nous étudions les potentialités du radar pour des applications agrométéorologiques en comparant les "outputs" du modèle PROCULTURE ayant en données d'entrée, soit les estimations de précipitations radar, soit celles mesurées par les stations au sol.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Données radar

Les données radar utilisées pour cette étude sont des données horaires extraites des images du radar de Wideumont (cf. 2.2 - Partie I-Chapitre 2). Le produit de base fourni par le radar météorologique est une image des précipitations générée en temps réel toutes les 5 minutes. Les cumuls horaires sont calculés à partir de ces images instantanées.

2.2. Données des stations météorologiques

Les données pluviométriques utilisées pour cette étude sont les données horaires de précipitations, de température et d'humidité relative extraites des 14 stations pluviométriques automatiques des réseaux du Ministère de l'Equipement et des Transports de la Région Wallonne (MET-SETHY), de la Promotion Agrométéorologique au Sud-Est de la Belgique (PAMESEB), de l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM) et de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) (Figure I-2-2).

2.3. Modèle de la simulation des périodes d'infection de la septoriose

Un système d'aide à la décision a été développé en Belgique (Moreau et Maraite, 1999) afin d'aider les agriculteurs à lutter contre *Septoria tritici* sur le blé d'hiver durant la phase de montaison de la culture. Il calcule en temps réel les interactions entre le développement du blé d'hiver et de *Septoria tritici* pour simuler la progression de la maladie dans le feuillage. La base de données du système fonctionne avec des données météorologiques horaires (Pluie, humidité relative et température) des stations les plus proches des champs de blé pour identifier les périodes d'infection qui favorisent le développement de la septoriose. Le système permet d'identifier le début des périodes d'infection en utilisant, pour ce qui concerne les précipitations, les conditions suivantes :
Au cours de deux heures consécutives de pluie, les précipitations doivent être supérieures ou égales à 0.1 mm durant la première heure pour préparer les pycnides, et supérieures ou égales à 0.5 mm dans la deuxième heure pour l'éclaboussure de ces pycnides (Calay et al., 2002).

Sur base de ces conditions nous allons essayer de déterminer la capacité du radar à simuler les périodes d'infection de *S. tritici* en analysant la correspondance entre les dates d'infection estimées par le radar et celles observées par les stations au sol.

2.4. Données d'observation du développement de la septoriose

Trois périodes de croissance ont été testées dans cette étude : 2003, 2004 et 2005. Pendant ces trois années nous avons effectué un suivi des principales maladies foliaires observées sur les trois dernières feuilles de différentes variétés semées dans trois sites d'essai (Everlange, Reuler et Burmerange) implantés au G-D de Luxembourg, selon un bloc comprenant chacun quatre répétitions de chaque variante testée. Ces observations ont été faites à partir de la montaison jusqu'à la récolte. Le suivi de la culture s'étend du mois d'avril jusqu'à la mi-juillet, à une fréquence d'une fois par semaine. La numérotation des étages foliaires commence par la dernière feuille formée qu'on note F1, précédée de l'avant dernière notée F2 et ainsi de suite.

L'estimation visuelle de développement de la maladie sur la surface foliaire a été réalisée selon les échelles de sévérité de James (1971) et le logiciel Distrain (Tomerlin et Howell, 1988). Les périodes d'infection sont estimées à partir de l'évolution de la sévérité des symptômes foliaires. Pour déterminer la date d'une infection, on décompte de la date d'apparition des symptômes liés à cette infection, le nombre de jours qui correspond à la

phase de latence calculée par le modèle en utilisant l'équation polynomiale développée par Shaw (1990).

Ces observations ont été menées dans le cadre du travail de la thèse d'El Jarroudi (2005) et dans le cadre d'un projet de recherche (le projet SINTAMA, 2003-2006) coordonné par le Département Environnement et Agrobiotechnologies (EVA) du Centre de Recherche public Gabriel Lippmann (CRP-GL) en collaboration avec le Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège. Ce projet a pour objet d'étude d'instaurer une lutte intégrée pour les maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au G-D de Luxembourg.

Durant cette étude nous avons également utilisé les données d'observation du site d'Humain situé dans la province de Luxembourg. Les données de ce site ont été récoltées dans le cadre d'un projet de recherche (Le projet SINPREMA) ayant pour objectif la conception d'un outil économique d'aide à la décision en matière d'utilisation minimale de fongicides en culture du blé d'hiver. Le projet était coordonné par le Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège.

2.5. La méthodologie d'analyse des données

La méthode statistique utilisée dans cette étude est basée sur les tableaux de contingence (Wilks, 1995). (cf. 2.2 Partie I-Chapitre 2).

3. RÉSULTATS

Dans cette partie de l'étude nous procédons au test des potentialités du radar météorologique de Wideumont à simuler les périodes d'infection de *S. tritici*. L'évaluation est faite en comparant les données de simulation du modèle PROCULTURE et les estimations visuelles de symptômes de la maladie. La vérification est d'abord faite en comparant le nombre d'heures par jour favorables à une infection par *S. tritici* simulée par PROCULTURE en utilisant, comme données d'entrée, soit les données de précipitations radar, soit les données des stations pluviométriques. Ensuite, les données de sortie du modèle sont comparées aux estimations visuelles du développement de la maladie sur les trois dernières feuilles.

3.1. Application épidémiologique du radar de Wideumont : cas de la simulation du nombre d'heures favorables à une infection

L'impact des estimations radar sur la simulation du nombre d'heures favorables à une infection par PROCULTURE est évalué entre le 1er mars et la fin juillet[1] durant trois saisons culturales 2003, 2004 et 2005 de 14 stations pluviométriques. L'évaluation a été réalisée en utilisant les tableaux de contingence. Les scores de vérification statistiques (POD, FAR et CSI) ont été déterminés à partir de ces tableaux pour chaque mois (Tableau I-3-1). Le tableau 1 (Tableau I-3-1) donne le nombre d'heures total de risque potentiel d'infection et les valeurs de POD, FAR et CSI déterminées pour 14 stations durant les trois périodes de croissance étudiées. Pour cette comparaison on dispose également de données d'humidité relative et température sur l'ensemble des stations. Les outputs du modèle sont constitués par le nombre d'heures par jour, favorables à une infection des trois dernières feuilles par *S. tritici.*

Les résultats de l'analyse montrent que les valeurs de POD pour les trois ans sont de l'ordre de 83% et les valeurs de FAR sont de l'ordre de 24%. Dans un système de prévision, tel que la prévision de *S. tritici,* il est important d'avoir un POD élevé. En effet l'agriculteur sera plus ennuyé par des erreurs d'omission (faible POD) car cela aurait pour conséquence que des périodes d'infection pourraient ne pas être prises en compte dans PROCULTURE et cela engendrerait l'apparition de symptômes inattendus et donc un traitement trop tardif. Une valeur de 24% de FAR pourrait toutefois conduire à des traitements inutiles ou au moins trop précoces.

[1] The choice of this period corresponds to the growing season and life cycle of *S. tritici*

Tableau I-3-1. Comparaison entre le nombre d'heures total de risque potentiel d'infection simulé par PROCULTURE (sur les trois dernières feuilles) en utilisant les données des 14 stations pluviométriques et les données de précipitations radar durant trois saisons culturales 2003, 2004 et 2005.
Comparison between Septoria tritici infection periods (in hours on the last three leaves) simulated by PROCULTURE using 14 rain-gauge stations and radar estimates for the cropping seasons of 2003, 2004 and 2005.

Years	Stations	Gauge[a]	Radar[b]	POD[c]	FAR[d]	CSI[e]
2003	BURMERANGE[f2]	45	38	0.83	0.23	0.67
	CHIMAY[h]	92	92	0.86	0.14	0.75
	DOURBES[g]	84	93	0.96	0.19	0.79
	ECHTERNACH[fl]	49	57	1.00	0.21	0.79
	ERNAGE[g]	90	111	0.90	0.18	0.76
	GOUVY[h]	76	63	0.68	0.25	0.56
	HAVELANGE[h]	120	85	0.63	0.14	0.58
	HUMAIN[g]	106	118	0.97	0.13	0.85
	LIBRAMONT[h]	87	67	0.63	0.33	0.48
	REULER[fl]	-	-	-	-	-
	SOIGNIES[h]	85	89	0.83	0.17	0.71
	SOMMETHONNE[h]	78	86	0.86	0.25	0.67
	THUIN[h]	99	108	0.88	0.17	0.75
	USELDANGE[fl]	77	59	0.76	0.16	0.67
		1088	1066	**0.83[k]**	**0.20**	**0.69**
2004	BURMERANGE	61	82	0.90	0.33	0.62
	CHIMAY	80	87	0.87	0.26	0.67
	DOURBES	67	60	0.84	0.20	0.70
	ECHTERNACH	47	53	0.89	0.16	0.76
	ERNAGE	63	85	0.96	0.30	0.68
	GOUVY	62	68	0.81	0.32	0.59
	HAVELANGE	82	79	0.76	0.31	0.56
	HUMAIN	81	77	0.91	0.23	0.71
	LIBRAMONT	99	65	0.67	0.38	0.47
	REULER	81	65	0.83	0.32	0.60
	SOIGNIES	75	64	0.64	0.25	0.53
	SOMMETHONNE	70	73	0.75	0.33	0.55
	THUIN	71	67	0.84	0.30	0.62
	USELDANGE	75	72	0.83	0.21	0.68
		1014	997	**0.82**	**0.28**	**0.62**
2005	BURMERANGE	52	58	0.79	0.24	0.63
	CHIMAY	80	67	0.74	0.31	0.56
	DOURBES	64	70	0.91	0.05	0.88
	ECHTERNACH	42	51	0.94	0.20	0.76
	ERNAGE	48	78	0.94	0.45	0.53
	GOUVY	79	62	0.88	0.19	0.73
	HAVELANGE	43	62	0.74	0.33	0.54
	HUMAIN	75	73	0.93	0.11	0.83
	LIBRAMONT	77	67	0.69	0.31	0.53

	REULER	81	62	0.86	0.14	0.75
	SOIGNIES	77	73	0.72	0.25	0.58
	SOMMETHONNE	102	89	0.94	0.21	0.75
	THUIN	73	80	0.79	0.21	0.65
	USELDANGE	68	64	0.83	0.20	0.69
		961	956	**0.84**	**0.23**	**0.67**
ALL		3063	3019	**0.83**	**0.23**	**0.66**

[a] Total number of hours of high probability of infection simulated when using rain-gauge precipitation data.
[b] Total number of hours of high probability of infection simulated when using RMI-Radar rainfall data.
[c] Probability Of Detection of *S. tritici* infection simulated by PROCULTUTRE.
[d] False Alarm Ratio of *S. tritici* infection simulated by PROCULTUTRE.
[e] Critical Success index of *S. tritici* infection simulated by PROCULTUTRE.
[f] ASTA (f1) and CRP-Gabriel Lippmann (f2) stations in Luxembourg.
[g] RMI stations.
[h] PAMESEB stations.
[k] The average for each cropping season indicated by bold values.
- Missing data.

Les résultats du tableau I-3-1 montrent que l'erreur radar en moyenne est de l'ordre de 17% pour les erreurs d'omission ("Misses") et 24% pour les erreurs de fausses alarmes si l'on considère que les stations au sol représentent la référence pour l'évaluation du système radar. Si on ne considère plus les mesures par les pluviomètres comme la référence, la précision de la mesure des stations au sol doit être analysée et l'erreur de mesure du pluviomètre va s'ajouter à l'erreur radar. La part de ces deux types d'erreur sera difficile à déterminer. Le but de la partie suivante est de vérifier par des données d'observation du développement des maladies, les potentialités du radar à simuler la maladie et par conséquent à mieux caractériser l'origine de l'erreur.

3.2. Application épidémiologique du radar de Wideumont : cas de la simulation des périodes d'infection de *S. tritici*

L'évaluation du modèle PROCULTURE a été effectuée durant trois saisons culturales (2003, 2004 et 2005). Cette évaluation qualitative a été réalisée par l'utilisation des tableaux de contingence. Les trois indices POD, FAR et CSI ont été calculés pour quatre stations disposant d'observations sur les maladies à proximité et pour chaque période de croissance de la culture du blé d'hiver. Le tableau suivant (Tableau I-3-2) représente les résultats de la comparaison entre les données d'observation et les données de simulation du modèle en utilisant les données des 4 stations pluviométriques (Humain, Useldange, Burmerange et Reuler) et les données radar. La comparaison a été faite entre les données de simulation du modèle et les données d'observation de la maladie sur les trois dernières feuilles (F1, F2 et F3).

Tableau I-3-2. Comparaison entre les données de sortie du modèle PROCULTURE ayant en données d'entrée, soit les estimations de précipitations radar, soit celles mesurées par les 4 stations pluviométriques. La comparaison a été faite entre les données de simulation du modèle et les données d'observation de la maladie sur les trois dernières feuilles (F1, F2 et F3).
Comparison of the performance of using rain gauge or radar rainfall data in the PROCULTURE model for capturing S. tritici infection events on winter wheat at four sites and during three cropping seasons. The disease development was considered only on these top leaves

Field sites	Observation period	Year	Events[a]	Duration of infection period[b]		POD[c]		FAR[d]		CSI[e]	
				Gauge	Radar	Gauge	Radar	Gauge	Radar	Gauge	Radar
HUMAIN	21/05-05/07	2003	18	60	62	0.93	0.83	0	0	0.93	0.83
	03/05-28/06	2004	16	46	40	0.73	0.87	0	0	0.73	0.87
	20/05-15/07	2005	8	24	27	0.86	1.00	0	0.12	0.85	0.87
			42	130	129	**0.84[f]**	**0.90**	**0**	**0.04**	**0.84**	**0.86**
USELDANGE	13/05-29/06	2003	15	56	44	0.87	0.80	0	0	0.87	0.80
	16/05-09/07	2004	18	48	48	0.72	0.78	0	0	0.72	0.78
	14/05-12/07	2005	15	33	32	0.71	0.86	0.09	0.07	0.67	0.81
			48	137	124	**0.77**	**0.81**	**0.03**	**0.02**	**0.75**	**0.80**
BURMERANGE	17/05-03/07	2003	10	30	22	0.70	0.70	0	0	0.70	0.70
	05/05-13/07	2004	15	43	55	0.73	0.93	0	0	0.73	0.93
	12/05-04/07	2005	12	24	28	0.91	0.83	0	0	0.91	0.83
			37	97	105	**0.78**	**0.82**	**0**	**0**	**0.78**	**0.82**
REULER	-	2003	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	27/05-05/07	2004	10	45	32	0.70	0.70	0	0	0.70	0.70
	16/05-11/07	2005	11	24	23	0.82	1.00	0	0	0.82	1.00
			21	69	55	**0.76**	**0.85**	**0**	**0**	**0.76**	**0.85**
All			148	433	413	0.79	0.84	0.01	0.02	0.77	0.83

[a] Number of total occurrence events of infection deduced from visually observed symptoms in the field sites on the upper three leaves.
[b] Total number of hours with a high probability of infection simulated by PROCULTUTRE.
[c] Probability of detection of *S. tritici* infection is the number of cases infections are both simulated and observed to the number of infections observed.
[d] Ratio of false alarms of *S. tritici* infection is the number of observed infections not simulated to the number of infections observed on the field.
[e] Critical success index of *S. tritici* infection it takes into account both false alarms and missed events. The POD, FAR and CSI show the infection occurrence comparison between infection periods (on the last three leaves) determined by visual observations and simulated by the PROCULTURE model using four rain-gauges and weather radar estimates.
[f] The average for each field site over three cropping seasons indicated by bold values.
- No data

La figure I-3-1 donne un exemple de graphe de sortie du modèle PROCULTURE. Elle montre la simulation des périodes d'infection de *S. tritici* sur les trois dernières feuilles du blé d'hiver. Le graphe montre la moyenne journalière des données de précipitations radar, données du pluviomètre, de l'humidité relative et de la température enregistrées à la station d'Humain. Le tableau 3 (Tableau I-3-3) décrit l'estimation visuelle du développement des

symptômes de *S. tritici* sur les quatre sites (Humain, Useldange, Burmerange, Reuler). Le pourcentage de l'estimation visuelle de développement de la maladie est représenté sous forme d'une valeur moyenne de 40 plantes choisies de façon aléatoire (dix plantes par parcelle). Le test de comparaison statistique au seuil $\alpha = 5$ % appliqué sur les valeurs observées a permis de classer deux types de valeurs (Tableau I-3-3) : *i*) les valeurs en rouge qui représentent une différence significative par rapport à l'observation précédente et *ii*) les valeurs en noir qui ne montrent pas de différence significative avec les dernières observations faites sur le terrain. Le suivi de la surface foliaire septoriée estimée visuellement sur les cinq dernières feuilles dans les quatre sites d'essai (Humain, Burmerange, Useldange, Reuler) durant trois saisons culturales (2003 à 2005) a révélé des différences significatives entre les années, et une interaction entre les années et les sites ($p < 0.001$) (Tableau I-3-3).
La figure I-3-1 illustre aussi les périodes de latence de la maladie calculées à partir de l'équation polynomiale de Shaw (Shaw, 1990). La fin de la période de latence détermine l'apparition des symptômes de la maladie sur les trois dernières feuilles. Il est important de noter que le suivi de la maladie se fait à une fréquence d'une fois par semaine et que, entre deux observations successives, deux ou trois périodes de latence pourraient se manifester. Lorsque le nombre est supérieur à 1, il est impossible de réussir à connaître avec précision la date de chaque infection et de savoir le nombre d'infections qui ont eu lieu entre ces deux observations. Tout ce qu'on peut vérifier est s'il y a infection au cours de cette période.

Le tableau 2 (Tableau I-3-2) montre que, sur 171 événements analysés durant trois saisons culturales étudiées, la différence entre le nombre d'heures favorables à l'infection par *S. tritici* simulé par PROCULTURE en utilisant les données radar (413) n'est pas significative au regard du nombre d'heures trouvé en utilisant les données des stations météo (431). Sur le site d'Humain, sur 42 événements, 90% des symptômes observés ont été correctement simulés par modèle en utilisant les données radar, alors que seulement 84% des cas ont été simulés avec succès en utilisant les stations météo (Tableau I-3-2). En outre, seulement 4% des symptômes de *S. tritici* observés n'avaient pas été correctement simulés par PROCULTURE en utilisant les données radar (Tableau I-3-2). Pour les trois autres sites, Useldange, Burmerange et Reuler, respectivement sur 48, 37 et 44 événements d'infection, le radar a beaucoup mieux simulé les périodes d'infection (Tableau I-3-2).

L'analyse des résultats montre aussi que, pour les quatre sites, les valeurs de POD calculées pour le radar sont supérieures à celles déterminées pour les stations au sol. Les valeurs de FAR sont quasiment nulles pour les deux systèmes.

En résumé, les résultats montrent les potentialités du radar à simuler les périodes d'infections réellement constatées sur le terrain. Il n'y a pas de différence significative entre les deux estimations des précipitations. Les deux méthodes ont donc la même valeur au niveau de l'analyse en un point. Par contre la méthode basée sur les données radar va permettre une bien meilleure extrapolation spatiale et conduire à une représentation spatiale bien plus performante lorsqu'il faudra fournir des informations à une échelle régionale car le radar peut exprimer l'occurrence des précipitations de manière continue dans l'espace.

Tableau I-3-3. Estimation visuelle du développement des symptômes de *S. tritici* sur les cinq dernières feuilles dans les quatre sites d'essai (Humain, Useldange, Burmerange, Reuler) durant trois saisons culturales (2003 à 2005). Le pourcentage de l'estimation visuelle de développement de la maladie est représenté sous forme d'une valeur moyenne de 40 plantes choisies de façon aléatoire (dix plantes par parcelle).
Visually estimated area (%) covered by sporulating *S. tritici* lesions on L5 to L1, for the winter wheat cultivars Achat, Bussard, Centenaire, Cubus, Dekan, Drifter, and Flair, between 2003 and 2005, at the trial sites of Burmerange, Humain, Reuler, and Useldange. The visually estimated area (%) represents the mean value made on 40 plants randomly chosen in 4 plots (10 plants/plot).

Year, site, cv and date		April		May		June					July
		7	22	5	19	2	10	16	23	30	7
2003											
BURMERANGE	**L5**	–	0.0*[a]	0.3	8.1*	36*	69*	–	–	–	–
Dekan	**L4**	–	–	–	–	2.6*	19*	59*	–	–	–
12 May[b]	**L3**	–	–	–	–	0.7*	5.3*	25*	41*	53*	–
	L2	–	–	–	–	0.1*	0.8	5.4*	14*	28*	–
	L1	–	–	–	–	0.0*	0.1	0.4	1.7*	5.8*	–
REULER	**L5**	–	–	–	–	0.9*	9.4*	–	–	–	–
Bussard	**L4**	–	–	–	–	0.4*	0.9	68*	–	–	–
2 June[b]	**L3**	–	–	–	–	–	0.2*	16*	26*	31	39
	L2	–	–	–	–	–	–	1.5*	10*	7	25*
	L1	–	–	–	–	–	–	–	0.3*	0.2	8.9*
HUMAIN	**L5**	–	–	–	–	10*	–	–	–	–	
Centenaire	**L4**	–	–	–	–	2.3*	–	–	–	–	
2 June[b]	**L3**	–	–	–	–	0.3*	0.1		25*		88*
	L2	–	–	–	–	–	0.1*		11*		54*
	L1	–	–	–	–	–	0.1*		0.8*		11*
USELDANGE	**L5**	–	0.0*	0.4	13*	68*	84*	–	–	–	–
Achat	**L4**	–	–	–	0.3*	35*	43	–	–	–	–
19 May[b]	**L3**	–	–	–	0.4*	11*	21*	57*	83*	–	–
	L2	–	–	–	–	1.1*	3.3	19*	53*	62*	76*
	L1	–	–	–	–	0.6*	3.6*	9.4*	21*	45*	70*
		April		**May**				**June**			**July**
		9	**26**	**10**	**17**	**1**	**7**		**22**	**28**	**12**
2004											
BURMERANGE	**L5**	0.0*	0.2	1.5*	9.0*	45*	100*		–	–	–
Cubus	**L4**	–	–	–	0.7*	11*	30*		–	–	–

17 May[b]	**L3**	–	–	–	0.2*	3.4*	7.7*		29*	69*	–
	L2	–	–	–	–	1.1*	2.8		15*	41*	62*
	L1	–	–	–	–	0.1*	0.4		1.2*	7.9*	33*
REULER	**L5**	–	–	0.0*	1.1*	28*	61*		100*	–	–
Bussard	**L4**	–	–	–	0.1*	5.4*	17*		27*	100*	–
1 June[b]	**L3**	–	–	–	–	0.3*	1.5*		3.2	4.9	63*
	L2	–	–	–	–	–	–		0.0*	0.6	28*
	L1	–	–	–	–	–	–		–	0.1*	3.0*
HUMAIN	**L5**	–	0.9*	17*	–	–	–		–	–	–
Drifter	**L4**	–	–	2.1*	2.4	9.0*	–		–	–	–
24 May[b]	**L3**	–	–	0.1*	0.1	9.4*	9.0		28*	35	53*
	L2	–	–	–	–	1.4*	1.0		6.0*	10	36*
	L1	–	–	–	–	–	–		0.4*	2.7*	5.2*
USELDANGE	**L5**	–	–	1.4*	20*	100*	–		–	–	–
Achat	**L4**	–	–	–	0.9*	25*	51*		–	–	–
24 May[b]	**L3**	–	–	–	–	5.6*	10*		55*	52	–
	L2	–	–	–	–	1.3*	2.2		8.3*	9.5	39
	L1	–	–	–	–	–	0.0*		0.2	2.0*	7.9*
		April		**May**				**June**			**July**
		4	**25**	**9**	**17**	**30**	**6**	**13**	**20**	**27**	**4**
2005											
BURMERANGE	**L5**	–	2.2*	9.7*	55*	99*	–	–	–	–	–
Cubus	**L4**	–	–	0.2*	15*	74*	90*	–	–	–	–
20 May[b]	**L3**	–	–	–	6.0*	28*	38*	36	72*	66	–
	L2	–	–	–	1.0*	0.5	1.1	3.8	25*	46*	60*
	L1	–	–	–	–	–	0.0*	0.7	3.0*	14*	33*
REULER	**L5**	–	0.0*	1.6*	21*	93*	–	–	–	–	–
Flair	**L4**	–	–	1.2*	3.0*	37*	33	47*	–	–	–
30 May[b]	**L3**	–	–	–	0.1*	5.6*	4.7	7.8	13*	27*	–
	L2	–	–	–	–	–	0.1*	0.2	0.6	7.0*	41*
	L1	–	–	–	–	–	–	–	0.0*	0.5*	3.0*
HUMAIN	**L5**	–	0.6*	3.8*	30*	–	–	–	–	–	–
Drifter	**L4**	–	–	0.4*	2.8*	37*	53*	–	–	–	–
30 May[b]	**L3**	–	–	–	0.1*	4.5*	5.6	13*	35*	66*	–
	L2	–	–	–	–	0.1*	0.1	2.4*	6.0*	22*	27

	L1	–	–	–	–	–	–	0.1*	0.2	0.9	5.4*
USELDANGE	**L5**	–	0.7*	20*	39*	98*	–	–	–	–	–
Achat	**L4**	–	–	2.2*	4.7*	81*	91	–	–	–	–
23 May[b]	**L3**	–	–	0.1*	1.1	22*	26	25	44*	59*	–
	L2	–	–	–	–	1.1*	0.7	4.5*	10*	32*	42*
	L1	–	–	–	–	–	–	0.8*	2.7*	11*	24*

[a*] = The red values represent a significant difference ($P < 0.05$) between two successive observations in the field. The black values represent a non significant difference at alpha = 5%. Decimals are only indicated when percentage of disease severity is lower than 10%.

[b] Date of appearance of the flag leaf ligule/collar (Zadoks Growth Stage Z3.9).

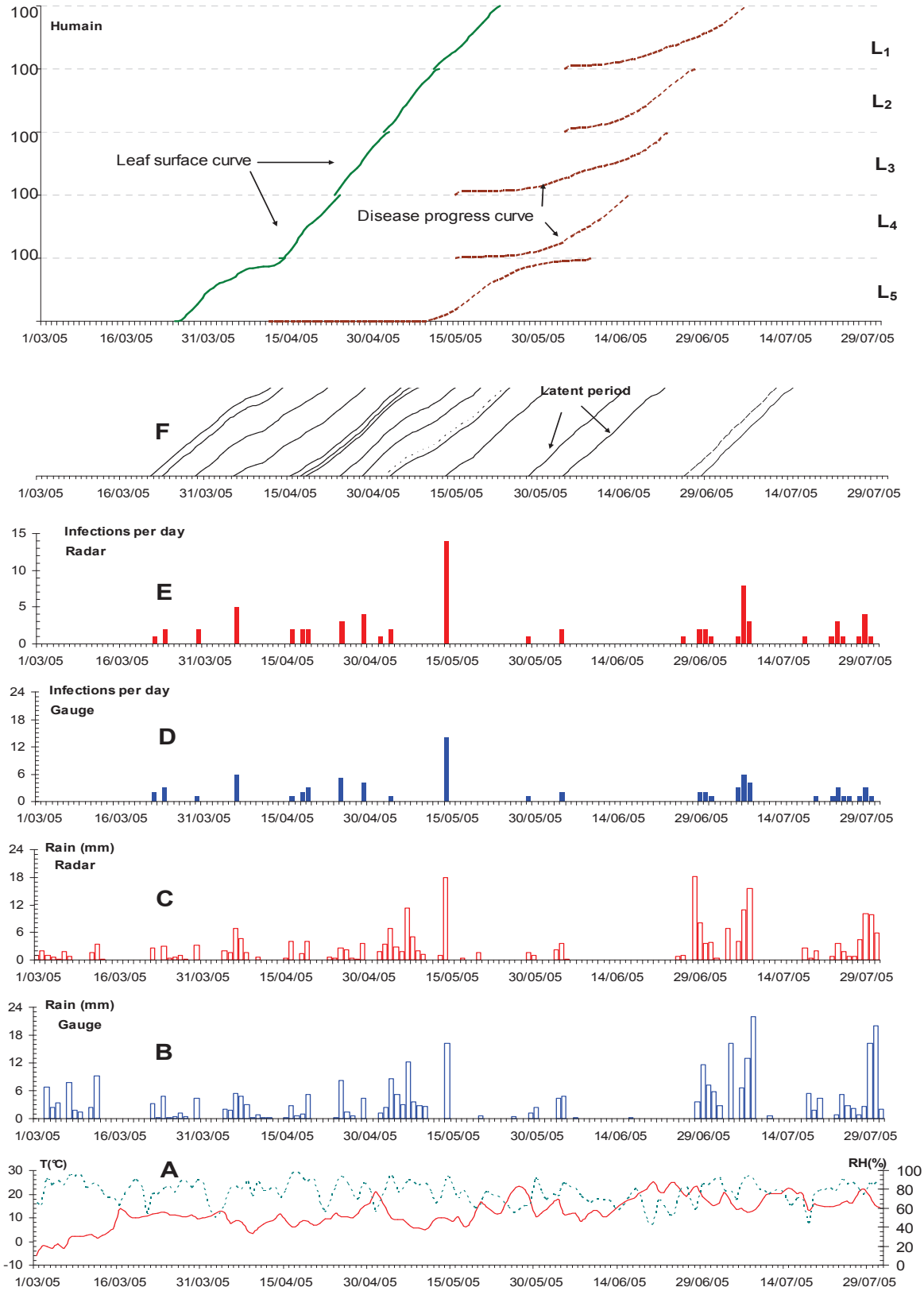


Figure I-3-1. Exemple de graphe de sortie du modèle PROCULTURE. Le graphe montre la simulation des périodes d'infection de *S. tritici* sur les trois dernières feuilles du blé d'hiver dans le site d'Humain en 2005.
A : la moyenne journalière des données de température (°C) et d'humidité relative (%) ;
B : la moyenne journalière des données du pluviomètre (mm) enregistrées à la station d'Humain ;
C : la moyenne journalière des données de précipitations radar (mm) ;

D : le nombre d'heures par jour de risque d'infection par *S. tritici* simulé avec PROCULTURE en utilisant les données du pluviomètre ;
E : le nombre d'heures par jour de risque d'infection par *S. tritici* simulé avec PROCULTURE en utilisant les données radar ;
F : les périodes de latence calculées par le modèle en utilisant l'équation polynomiale de Shaw (lignes pointillées indiquent les périodes de latence causées uniquement par des données radar) ;
G : les lignes pleines représentent le pourcentage de la surface verte (L5 à L1), lignes pointillées représentent la surface foliaire septoriée (%) sur L5 à L1.
Example of inputs and outputs of the Septoria leaf blotch risk simulation model (PROCULTURE) in winter wheat fields at the Humain site in 2005. A: Average daily air temperature (°C) and relative humidity (%). B: Rain gauge precipitation (mm) measured at Humain weather station. C: RMI-Radar rainfall estimates for Humain weather station. D: number of hours per day of high probability of infection determinated by using rain gauge precipitation data. E: number of hours per day of high probability of infection determinated by using radar rainfall estimates data. F: Latent period and duration (dashed line indicated the latent period caused only by radar rainfall data). G: Heavy lines scale representing the percentage of leaf area development for leaves L5 to L1. Dashed lines represent severity of Septoria (%) on L5 to L1.

3. CONCLUSIONS

- De l'analyse des résultats de l'ensemble des événements étudiés, il ressort qu'en moyenne 17% des cas n'ont pas été correctement simulés par PROCULTURE, ayant en données d'entrée les estimations des précipitations radar (POD = 0.83), et 24% en moyenne des événements ont été des fausses alertes (FAR = 0.24). Les données des stations au sol ont constitué la référence qui a servi à la comparaison du nombre d'heures par jour de risque d'infection par *S. tritici* simulé avec PROCULTURE.

- L'impact des estimations radar sur le contrôle de la *S. tritici* au G-D de Luxembourg a été évalué durant trois saisons culturales et sur quatre sites d'essai. L'évaluation de la prévision des périodes d'infection de la maladie a été faite en utilisant les données de simulation du modèle PROCULTURE et des estimations visuelles du développement de la maladie comme données de référence. Les résultats font apparaître que l'erreur est la plupart du temps moindre lorsqu'on utilise les données radar et que le radar peut être utile pour améliorer les méthodes de prévision des périodes d'infection de *S. tritici.*

- Les résultats de l'analyse des données radar montrent bien les potentialités et les avantages d'utilisation d'un tel système dans des applications agrométéorologiques à l'échelle régionale, notamment pour la prévision des périodes d'infection de la septoriose ou pour la simulation d'autres maladies comme les rouilles, l'oïdium et la fusariose.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableaux :

Tableau I-3-1. Comparaison entre le nombre d'heures total de risque potentiel d'infection simulé par PROCULTURE (sur les trois dernières feuilles) en utilisant les données des 14 stations pluviométriques et les données de précipitations radar durant trois saisons culturales 2003, 2004 et 2005.. 73

Tableau I-3-2. Comparaison entre les données de sortie du modèle PROCULTURE ayant en données d'entrée, soit les estimations de précipitations radar, soit celles mesurées par les 4 stations pluviométriques. La comparaison a été faite entre les données de simulation du modèle et les données d'observation de la maladie sur les trois dernières feuilles (F1, F2 et F3)……...75

Tableau I-3-3. Estimation visuelle du développement des symptômes de *S. tritici* sur les cinq dernières feuilles dans les quatre sites d'essai (Humain, Useldange, Burmerange, Reuler) durant trois saisons culturales (2003 à 2005). Le pourcentage de l'estimation visuelle de développement de la maladie est représenté sous forme d'une valeur moyenne de 40 plantes choisies de façon aléatoire (dix plantes par parcelle)……..…78

Figures :

Figure I-3-1. Exemple de graphe de sortie du modèle PROCULTURE. Le graphe montre la simulation des périodes d'infection de *S. tritici* sur les trois dernières feuilles du blé d'hiver dans le site d'Humain en 2005. 81

RÉFÉRENCES

Calay, F., Coquillart, L., Lucas, C., Lemaire, D., Bodson, B., Moreau, J. M., and Maraite, H. (2002). Lessons from year 2001 *Mycosphaerella graminicola* epidemic on winter wheat in Belgium. Vol. 67, pp. 197-204, Meded Rijksuniv. Gent Fak. Landbouwkd Toegep. Biol. Wet.

Cicogna, A., Dietrich, S., Gani, M., Giovanardi, R., and Sandra, M. (2005). Use of meteorological radar to estimate leaf wetness as data input for application of territorial epidemiological model (downy mildew-*Plasmopara viticola*). *Physics and Chemistry of the Earth* **30**, 201-207.

Detrixhe, P., Chandelier, A., Cavelier, M., Buffet, D., and Oger, R. (2003). Development of an agrometeorological model integrating leaf wetness duration estimation to assess the risk of head blight infection in wheat. *Aspects of Applied Biology* **68**, 199-204.

Einfalt, T., Nielsen, A. K., Golz, C., Jensen, N. E., Quirmbach, M., Vaes, G., and Vieux, B. (2004). Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage. *Journal of Hydrology* **299**, 186-202.

Gillespie, T. J., and Sentelhas, P. C. (2008). Agrometeorology and plant disease management - a happy marriage. *Scientia Agricola* **65**, 71-75.

Hoppmann, D., and Wittich, K. P. (1997). Epidemiology-related modelling of the leaf-wetness duration as an alternative to measurements, taking *Plasmopara viticola* as an example. *Zeitschrift Fur Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz-Journal of Plant Diseases and Protection* **104**, 533-544.

Hubbard, K. G. (1994). Spatial variability of daily weather variables in the high-plains of the USA. *Agricultural and Forest Meteorology* **68**, 29-41.

James, C. A. (1971). Manual of assessment Keys for Plant Diseases. *Canada Department of Agriculture*. Publication No.1458, APS, St.Paul, MN, USA.

Krajewski, W. F., Ciach, G. J., and Habib, E. (2003). An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. *Hydrological sciences journal* **48**, 151-162.

Maggi, K., and Qinghua, G. (2007). Integrated agricultural pest management through remote sensing and spatial analyses. In: Ciancio, A., and Mukerji, K.G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601, 359 pages. 45-79.

Moreau, J. M., and Maraite, H. (1999). Integration of knowledge on wheat phenology and *Septoria tritici* epidemiology into a disease risk simulation model validated in Belgium. *Aspects of Applied Biology* **55**, 1-6.

Pietravalle, S., Shaw, M. W., Parker, S. R., and Van den Bosch, F. (2003). Modeling of relationships between wheather and *Septoria tritici* epidemics on winter wheat: acritical approach. *Phytopathology* **93**, 1329-1339.

Rowlandson, T. L., Gillespie, T. J., and Ford, R. P. (2004). Use of precipitation duration data from weather radar in leaf wetness estimates for plant disease management. *26th conference on Agricultural and Forest Meteorology*.

Rowlandson, T. L., Gillespie, T. J., and Ford, R. P. (2009). Application of canadian weather radar data to plant disease management schemes in Southern Ontario. *Atmosphere Oceane* **47**, 154–159.

Sauvageot, H. (1992). Radar Meteorology. Eyrolles, Paris.

Sauvageot, H. (1994). Rainfall measurement by radar - a review. *Atmospheric Research* **35**, 27-54.

Shaw, M. W. (1990). Effects of temperature, leaf wetness and cultivar on the latent period on *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat. *Plant Pathology* **39**, 255-268.

Tomerlin, J. R., and Howell, T. A. (1988). Distrain - a computer-program for training people to estimate disease severity on cereal leaves. *Plant Disease* **72**, 455-459.

Ulbrich, C. W., and Lee, L. G. (1999). Rainfall measurement error by WSR-88D radars due to variations in Z-R law parameters and the radar constant. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **16**, 1017-1024.

Workneh, F., Narasimhan, B., Srinivasan, R., and Rush, C. A. (2005). Potential of radar-estimated rainfall for plant disease risk forecast. *Phytopathology* **95**, 25-27.

Workneh, F., Narasimhan, B., Srinivasan, R., and Rush, C. M. (2006). Assessment of regional site-specific *Sorghum ergot* severity potential using radar-rainfall measurement. *Plant Disease* **90**, 704-707.

PARTIE II : APPLICATION DU MODÈLE SWEB POUR LE CONTRÔLE DE LA SEPTORIOSE SUR LES FEUILLES DE BLÉ D'HIVER

Application du modèle SWEB pour le contrôle de la septoriose sur les feuilles de blé d'hiver

Chapitre 1 *: Synthèse bibliographique de l'humectation au niveau du couvert végétal*

Chapitre 2 *: Mesure de la durée d'humectation*

Chapitre 3 *: Simulation de la durée d'humectation*

Chapitre 4 *: Étude de l'impact des périodes d'humectation sur le développement de la septoriose sur les feuilles de blé d'hiver*

PARTIE II

Chapitre 1

Synthèse bibliographique de l'humectation au niveau du couvert végétal

RÉSUMÉ

La présence d'eau libre à la surface végétale sous forme de pluie ou de rosée, appelée encore humectation, joue un rôle déterminant lors du processus d'infection des plantes par des agents pathogènes. La durée d'humectation constitue une variable agrométéorologique importante dans les systèmes de prévision des risques épidémiques. Dans ce chapitre nous passerons en revue les recherches effectuées sur les différentes méthodes de détermination de la durée d'humectation, leur comparaison et l'intérêt de certaines d'entre elles, dans le but de trouver la meilleure méthode pour déterminer ce paramètre à la surface des feuilles de blé d'hiver. Cette étude a aussi pour objectif de comprendre les paramètres météorologiques qui influencent l'évolution de l'épidémie de la septoriose et de répondre ainsi à la demande d'un besoin de système opérationnel de protection de la culture du blé d'hiver.

Mots Clés : *Eau libre, Durée d'humectation, Couvert de blé d'hiver, Agents pathogènes, Variables agrométéorologiques.*

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte général

L'humectation superficielle et plus particulièrement la durée d'humectation ou le temps pendant lequel les feuilles du couvert restent mouillées à la suite d'une précipitation ou durant un dépôt de rosée (Van der Wal, 1978), est d'une importance toute particulière notamment pour les systèmes de protection des plantes (Huber, 1992; Magarey et al., 2005a). Néanmoins, cette variable demeure toujours difficile à déterminer, puisque l'humectation varie

considérablement en fonction des conditions météorologiques, du type de cultures, de la position, de l'emplacement, de la géométrie et de l'orientation des feuilles (Sutton et al., 1984).

La bibliographie des trente dernières années fait état de nombreux travaux sur l'estimation de l'humectation à la surface du couvert végétal mais, malheureusement, sans jamais parvenir à une méthode standard largement acceptée pour sa mesure (Magarey et al., 2005a). La mesure de la durée d'humectation ne fait, le plus souvent, pas partie des observations instrumentales effectuées par les stations des réseaux agrométéorologiques, ce paramètre n'étant pas considéré comme une vraie variable météorologique. Le problème principal du manque d'observations de la durée d'humectation dans les stations météo est lié à l'absence de standardisation des capteurs d'humectation et des protocoles rigoureux de mesures ; leur mise en œuvre dans les conditions de la pratique est souvent délicate et s'est toujours heurtée à des problèmes de calibration des mesures par rapport aux observations (Huber, 1992; Magarey et al., 2005a). En outre, la plupart des capteurs donnent des mesures indirectes et par conséquent l'interprétation de ces données est souvent plus difficile (Sabatini et al., 2005). Enfin, plusieurs appareils de mesure de la durée d'humectation ont été développés, mais sans jamais parvenir à un instrument pleinement satisfaisant du fait que le bilan d'énergie au niveau d'un capteur est différent d'un organe végétal et peu représentatif de la variabilité spatiale existant au sein du couvert (Dalla Marta et al., 2008; Lulu et al., 2008; Santos et al., 2008b; Schmitz et Grant, 2009; Sentelhas et al., 2005).

De ce fait l'approche théorique de détermination de la durée d'humectation devient une alternative évidente aux méthodes de mesure. Ce paramètre, qui ne peut pas être une mesure standard des stations météorologiques, peut être estimé à partir des variables météorologiques et des propriétés du couvert végétal.

Ce chapitre fait le point sur l'état des connaissances sur l'humectation foliaire (la définition, les causes, l'importance de l'humectation et la distribution de l'eau à la surface des feuilles), sur sa détermination en se référant aux différentes recherches menées. Une description des modèles de détermination de la durée d'humectation ainsi que le modèle retenu pour notre étude sont enfin présentés.

1.2. Causes de l'humectation à la surface du couvert végétal

Les précipitations sous forme de rosée ou de pluie sont les principales causes naturelles de l'humectation du couvert végétal. Ces deux phénomènes diffèrent fortement : l'un constitue un événement météorologique quasi-indépendant du système sol-plante-microclimat, l'autre résulte du déficit radiatif compensé par un flux de chaleur latente (Garratt et Segal, 1988; Huber et Gillespie, 1992).

La rosée se produit quand la température à la surface des feuilles baisse au point de déclencher la condensation de la vapeur d'eau contenue dans la couche d'air voisine, entraînant la formation de gouttelettes d'eau qui se déposent sur les surfaces végétales. La rosée constitue un apport d'eau le plus souvent négligeable au sens du bilan hydrique, mais elle devient tout à fait significative lorsque l'on considère la durée d'humectation des organes végétaux. Les quantités maximales de dépôt de rosée mesurées par nuit peuvent aller de 0.3 à 0.6 mm et la vitesse théorique maximale de la formation de la rosée est environ 0.08 mm par heure (Garratt et Segal, 1988). Il est important de faire la différence entre la condensation sur les feuilles à partir de la vapeur d'eau atmosphérique ("dew fall") et la condensation sur le couvert de vapeur d'eau issue de la vaporisation de l'eau du sol sous l'action d'un gradient thermique (dew rise or distillation) (Monteith, 1957).

À la différence de la rosée, la pluie se produit sous une large gamme de températures et contribue par le phénomène de "splashing"[1] à la dissémination des spores (Royle et Butler, 1986). La durée d'humectation causée par la pluie peut s'étendre sur des jours, alors que la rosée se produit usuellement en début et en fin de nuit. La détermination de l'humectation peut également être peu précise lorsque la pluie présente une grande variabilité spatiale notamment dans les situations de précipitations convectives ou dans des zones à forte variabilité topoclimatique (Linacre, 1992). En outre, la pluie est un phénomène compliqué à appréhender. Nombreuses sont les variables caractérisant la pluie : durée, intensité, spectre du diamètre des gouttes, direction de chute, etc… L'aspect probablement le plus important de la pluie dans le phénomène d'humectation est son interception par le couvert végétal (Magarey et al., 2005a).

Un grand nombre de maladies des céréales, la septoriose et la fusariose du blé par exemple, se répandent dans la culture par le transport des spores dans des gouttelettes d'éclaboussure

[1] Le rebond de gouttelettes à partir de la chute d'une grosse goutte sur une surface recouverte d'un film d'eau ("rain splash")

(Lovell et al., 1997). Dans la littérature on trouve certains articles qui traitent de ce phénomène (Fitt et al., 1989; Geagea et al., 2000; Huber et al., 1997; Saint-Jean et al., 2004). La pluie peut jouer également un rôle défavorable dans les processus d'infection par le lessivage des spores de certains champignons pathogènes (cas de l'oïdium par exemple).

L'irrigation par aspersion peut aussi être une cause importante d'humectation des feuilles. L'influence de l'irrigation sur les maladies des plantes est évidente. Elle peut avoir un impact sur le niveau d'infestation de certains parasites (Huber et Gillespie, 1992; Lomas, 1991; Magarey et al., 2005b; Rotem et Palti, 1969).

1.3. Définitions des variables utilisées pour caractériser l'humectation

Parmi les difficultés liées au mesurage de la durée d'humectation relevons celles qui sont dues à l'imprécision de la définition de cette variable puisque l'humectation à la surface des feuilles est due à la pluie et à la rosée et la répartition de l'eau sur une surface est rarement uniforme (portions du film d'eau, populations de gouttes, zones d'accumulation privilégiée de l'eau). En outre, il n'existe pas de méthode standard pour l'observation de la durée d'humectation (Sabatini et al., 2005) et les capteurs fournissent des mesures indirectes et ils doivent être adéquatement calibrés pour chaque culture (Schmitz et Grant, 2009).

À la différence de la température ou l'humidité relative par exemple, qui sont des variables atmosphériques parfaitement définies, il n'y a pas de méthode standard largement acceptée pour la détermination du phénomène d'humectation qui caractérise l'état de la surface d'un organe végétal. Plusieurs termes ont été utilisés pour caractériser l'humectation à la surface du couvert végétal : variables directement liées à l'humectation (surface mouillée, volume, masse de la goutte ou du film d'eau) ; variables correspondant à la réponse d'un capteur (mécanique, électronique ou radiométrique) ; et très rarement des indicateurs d'humectation qui correspondent à des estimations visuelles ou tactiles (Huber et al., 1991).

L'humectation d'une surface végétale est généralement définie comme étant la présence d'eau visible à la surface des organes (Armstrong et al., 1993; Gillespie et Kidd, 1978; Hoppmann et Wittich, 1997; Potratz et al., 1994; Weiss et Hagen, 1983). Bien que le terme "humectation foliaire" ("leaf wetness") soit généralement utilisé pour décrire l'humectation à la surface des feuilles, il est trop spécifique puisque l'humectation peut se produire également sur les autres organes végétaux tels que les tiges, fleurs ou fruits (Magarey et al., 2005b). L'humectation superficielle (surface wetness) est un terme préféré puisqu'elle s'applique à l'humectation sur

tous les organes végétaux (Butt et McGlinn, 1989; Hirst, 1954). A l'échelle du couvert ("canopy scale"), l'observation visuelle de l'humectation apparaît comme la définition la plus appropriée car c'est une méthode non destructive qui permet une observation rapide de l'humectation sur l'ensemble du couvert.

1.4. Distribution de l'eau à la surface du couvert végétal

L'observation de différents couverts végétaux après une pluie ou une rosée montre une extrême variabilité du mode de répartition de l'eau à la surface des organes végétaux. Cette variabilité est imputable à la forme des organes végétaux, leur disposition dans l'espace (égouttement, l'écoulement le long de la tige), la nature physique ou chimique de la surface et le type de précipitations. Il est particulièrement difficile de prendre en compte cette variabilité ; néanmoins, il est possible de faire certaines distinctions entre les plantes en considérant la mouillabilité de leurs surfaces foliaires ou leurs capacités d'interception à l'échelle du couvert (Huber, 1988).

L'humectation existe généralement sous forme de grosses gouttes qui humidifient une superficie de 6 à 20% de la surface de la plante (Brain et Butler, 1985; Norman et Campbell, 1983). Le pourcentage de la surface mouillée varie considérablement d'une culture à l'autre. Pour le blé par exemple, environ 10 à 15% (Butler, 1986) de la surface foliaire est mouillée sous forme de gouttes après la pluie. L'humectation peut également être présente à la surface du couvert sous forme d'un film d'eau couvrant une proportion importante de la superficie dans certaines circonstances. C'est le cas par exemple des feuilles immatures (Hall et al., 1997).

2. MÉTHODES ET INSTRUMENTS DE MESURE DE LA DURÉE D'HUMECTATION

Différentes techniques ont été développées pour mesurer la durée d'humectation. Les principes physiques des différentes méthodes et instruments utilisés pour mesurer indirectement la durée d'humectation se basent sur la variation de la constitution physique et de longueur de l'élément sensible, de masse de la surface considérée, de conductibilité électrique d'un capteur et de caractéristiques radiométriques de surface (Huber et Gillespie, 1992).

Plusieurs auteurs ont suggéré un seuil d'humidité relative (mesurée au parc météorologique) comme alternative à la mesure par les capteurs d'humectation pour estimer la durée d'humectation (Krause et al., 1975; Madden et al., 1978; Sutton et al., 1984; Sutton et al., 1986; Wilks et Shen, 1991). Cependant, plusieurs autres études ont montré une corrélation relativement faible entre les périodes d'humidité élevée et l'humectation (Francl et Panigrahi, 1997; Lomas et Shashoua, 1970; Rao et al., 1998; Sentelhas et al., 2004; Wallin, 1963). En outre, ces méthodes demeurent fort approximatives. L'utilisation de l'humidité relative élevée au lieu de l'humectation peut avoir également comme conséquence une surestimation du risque de maladie des plantes (Jones, 1986).

Vis-à-vis de ces méthodes empiriques, se sont développées plusieurs familles de capteurs pour mesurer la durée d'humectation. Elle peut être mesurée de manière relative au moyen d'un capteur placé au sein même de la végétation. Son principe est la mesure de la variation de la longueur ou de la résistance électrique d'un capteur en fonction de la quantité d'eau libre qui s'y dépose. Bien que de nombreux travaux aient abouti à la mise au point de capteurs de plus en plus performants, leur mise en œuvre dans des conditions pratiques s'est toujours heurtée à des problèmes de calibration des mesures par rapport aux observations (Magarey et al., 2006b; Schmitz et Grant, 2009). Comme déjà signalé, l'absence de standardisation ou de protocoles rigoureux de mesures rend difficile la comparaison des observations effectuées au cours d'années successives ou dans des sites différents (Sabatini et al., 2002). Les mesures de la durée d'humectation à l'intérieur d'une couverture végétale sont peu fiables en raison de la variabilité spatiale des différents facteurs d'hétérogénéité du milieu (Mahtour et al., 2010) et de la position relative des capteurs. Des capteurs d'humectation placés à différentes positions du couvert végétal montrent une variabilité considérable entre les capteurs (Penrose et Nicol, 1996). Outre le fait qu'il est difficile d'obtenir des informations représentatives des conditions au sein d'une parcelle, le problème majeur réside cependant dans la spatialisation des observations ponctuelles pour produire une information exploitable pour un ensemble de parcelles à l'échelle d'une région.

Les capteurs d'humectation sont classés en trois types : capteurs mécaniques, capteurs de mesure de la résistance électrique et méthodes radiométriques (Getz, 1992). Jusqu'au début des années 70, les capteurs mécaniques (Hirst, 1954; Lomas et Shashoua, 1970; Taylor, 1956; Wallin, 1963) ont été largement utilisés, mais ils ont été en grande partie remplacés par les capteurs électroniques (Schurer et van der Wal, 1972). Ce type de capteur consiste en une série d'éléments adjacents et indépendants, de taille allant des fils minces aux mailles (réseaux) de grilles gravés sur un circuit électronique (Huband et Butler, 1984; Weiss et Lukens, 1981). Bien que des éléments de la grille soient généralement écartés de 1 millimètre (Gillespie et Kidd, 1978) une étude en conditions contrôlées a montré qu'un écart entre les éléments de la grille de 0.25 millimètre est plus précis (Wei et al., 1995). Huband et Butler (1984) comparent six capteurs différents par la taille, la nature de la surface sensible, l'écartement entre les électrodes ; ils arrivent à mettre en évidence des différences entre capteurs allant jusqu'à 4.5 h au sommet d'un couvert de blé. La conclusion principale de ces comparaisons est que le comportement des capteurs dépend de la position dans le couvert et de leur orientation. Häckel (1980) et Weiss et al. (1988) ont étudié la mesure directe de l'humectation à l'aide d'un tissu en coton (feuille artificielle) et d'une feuille placés sur des grilles de fins fils électriques. Ces capteurs n'ont pas été largement adoptés, parce qu'ils doivent être faits sur mesure et des contrôles journaliers sont exigés pour s'assurer qu'ils soient en contact avec la surface de la feuille (Sutton et al., 1984).

Un autre type de conception de capteur consiste en une maille de fils couverts par un tissu de coton. Ce capteur fonctionne généralement mieux que les capteurs de circuit électrique gravé (Weiss et Hagen, 1983; Weiss et Lukens, 1981) mais pas aussi bien dans le cas d'une rosée prépondérante (Armstrong et al., 1993). La longévité du capteur sous forte pluie peut également être un problème. Une autre considération importante dans la conception de capteurs c'est que la taille et la forme du capteur soient semblables à celles de l'organe végétal à étudier (Sutton et al., 1984). Dans le cas par exemple d'une plante d'oignon, un capteur cylindrique était très efficace (Gillespie et Barr, 1984), alors que Huband et Butler (1984) utilisaient un capteur flexible pour simuler le mouvement des feuilles de blé dans le vent. Un capteur cylindrique a été plus efficace qu'un capteur plat pour une utilisation au sommet du couvert de pommier (Magarey, 1999). D'autres chercheurs ont également essayé d'imiter la forme du fruit ou de la feuille dans la construction des capteurs (Sutton et al., 1984).
Les chercheurs ont également testé le radar (Gillespie et al., 1990) et la transmission de micro-ondes comme outils pour estimer la durée d'humidité ou l'interception de l'eau (Bouten

et al., 1991; Wigneron et al., 1996). Le problème principal de ces techniques est que les conditions internes des plantes et sa propre teneur en eau influencent le signal. Un autre développement récent et prometteur est l'utilisation de la thermométrie infrarouge pour estimer la durée d'humectation (Deshpande et al., 1995). L'avantage de cette technique est que la mesure en infrarouge thermique est relativement représentative d'une grande surface par rapport au capteur électronique, et a le potentiel d'être utilisée en combinaison avec des techniques de télédétection. Les limitations de cette technique sont : le coût élevé du capteur IR.

Dans une étude très récente enfin, on a montré que la performance des capteurs cylindriques est dépendante des conditions météorologiques (Santos et al., 2008a) et que la durée d'humectation mesurée avec ces capteurs est plus longue d'environ 2 heures que celle obtenue par les capteurs plats standard.

3. SIMULATION DE LA DURÉE D'HUMECTATION

3.1. Introduction

En parallèle aux améliorations des capteurs d'humectation, se sont développés différents modèles de la durée d'humectation de la surface végétale (Huber et Gillespie, 1992; Weiss, 1990). Plusieurs modèles ont été développés pour la simulation de l'humectation à la surface des feuilles, mais peu d'entre eux ont été opérationnellement utilisés en agrométéorologie. Les modèles d'humectation peuvent être classés en modèles statistiques (empiriques) ou physiques. Les modèles statistiques se basent sur la régression linéaire, la classification analytique, les réseaux de neurones (neural network) ou la combinaison de ces méthodes. On trouve par exemple les travaux de Crowe et al. (1978), Galliani et Screpanti (1993) et Chtioui et al.(1999). Parmi les modèles statistiques les plus réussis, citons le modèle CART[2] (Gleason et al., 1994) et le modèle de réseau de neurones artificiel (ANN) qui est utilisé pour la détermination de l'humectation d'une feuille de blé (Francl et Panigrahi, 1997) et sur les grappes de vigne (Dalla Marta et al., 2005a). Vu la complexité entre les interactions des variables météorologiques et la formation de l'humectation et vu le nombre important de paramètres utilisés pour la manipulation de ces modèles, l'utilisation des modèles statistiques ne mène pas toujours à des résultats probants. Une alternative aux modèles statistiques sont les modèles physiques de type conceptuels qui se fondent sur le bilan hydrique et énergétique

[2] CART : Classification and Regression Tree Model

pour définir et décrire l'humectation. Au cours de ces trente dernières années, un grand nombre de modèles physiques de détermination de la durée d'humectation ont été développés. La plupart d'entre eux concerne la durée d'humectation due, soit à la rosée, soit à la pluie. Très peu de modèles déterminent l'humectation due à la fois à la pluie et à la rosée. L'approche du bilan d'énergie (Figure. II-1-1) peut être appliquée à un certain nombre d'échelles. Il existe trois échelles classiquement retenues pour la modélisation des transferts de masse et d'énergie au niveau des surfaces végétales : la modélisation à l'échelle de la goutte ("drop scale"), d'organe ("Leaf scale") ou du couvert ("canopy scale").

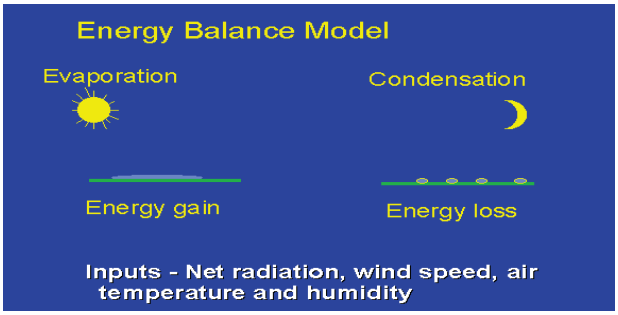


Figure II-1-1. Le modèle du bilan énergétique (Magarey, 1999).
Energy budget model (Magarey, 1999).

Pedro et Gillespie (Pedro et Gillespie, 1982a, b) ont développé un modèle adapté pour simuler à partir des données météorologiques, la durée de la rosée d'une feuille au sommet du couvert. Thompson (1982) a été un des premiers à développer un modèle multicouche à l'échelle du couvert pour l'estimation de la durée de mouillage. Récemment, un modèle fort intéressant connu sous le nom "Surface Wetness Energy Balance model" (SWEB) (Magarey, 1999; Magarey et al., 2006a) a été développé comme un modèle théorique pour la détermination de la durée d'humectation sur une large gamme de conditions d'applications potentielles.

3.2. Détermination de la durée d'humectation à différentes échelles

3.2.1. A l'échelle de la goutte ("drop scale")

Plusieurs modèles au niveau de la goutte ("Drop model") ont été développés, cependant leur utilisation a été limitée par la complexité des formes géométriques des gouttelettes, qui dépend de la mouillabilité, du séchage de la feuille et de la pluie ou de la rosée (Butler, 1985; Butler, 1990; LeClerc et al., 1985). La forme de la goutte à la surface d'une feuille est déterminée par son angle de contact (LeClerq, et al., 1985). Plusieurs formes géométriques ont été considérées dans les modèles : la plus évidente est la forme hémisphérique de la goutte (LeClerq et al., 1985), la forme hémisphérique aplatie (Barr et Gillespie, 1987) ou la

combinaison de ces formes (Butler, 1990). En plus la goutte change de forme au cours de son évaporation. Un autre inconvénient des modèles au niveau de la goutte, c'est qu'ils ne tiennent pas compte du film d'eau dans la description de la distribution de l'eau à la surface des feuilles. En général, la complexité du modèle à l'échelle de la goutte signifie qu'une approche plus simple est souhaitable.

3.2.2. A l'échelle d'un organe ("leaf and fruit scale")

Un certain nombre de publications se sont intéressées à la modélisation de la durée d'humectation à l'échelle d'un organe en particulier (Butler, 1980; Monteith et Butler, 1979; Payen, 1983; Pedro et Gillespie, 1982a, b). Le modèle de Pedro et Gillespie reste jusqu'à présent le meilleur modèle de la détermination de l'humectation due à la rosée sur une feuille (maïs et soja) au sommet du couvert. Le modèle a été testé par des données micrométéorologiques (Pedro et Gillespie, 1982a) et des données standard de stations météorologiques (Pedro et Gillespie, 1982b). L'erreur moyenne entre modèle et observations a été inférieure à 1 heure. Ce modèle a été adapté à plusieurs cultures et dans d'autres conditions climatiques (Detrixhe et al., 2003; Papastamati et al., 2004). Les modèles au niveau du fruit ("Fruit model") ont aussi été développés pour un certain nombre de cultures : détermination de la durée d'humectation due à la rosée sur la gousse de cacaoyer (Butler, 1980; Monteith et Butler, 1979) ou à la pluie sur les grappes de vigne (Huber et al., 1991) ou les deux sur les capitules de tournesol (Payen, 1983).

3.2.3. A l'échelle du couvert ("canopy scale")

Dans la pratique et en particulier lorsqu'on s'intéresse au développement de maladies, il est plus utile de considérer l'évaporation de l'eau à la surface d'un couvert végétal multi-couche que d'en considérer les feuilles ou des gouttes individuelles (Huber, 1988; Huber et Itier, 1990; Norman et Campbell, 1983; Thompson, 1982). L'intérêt d'une telle approche où le couvert est divisé en strates horizontales, c'est qu'il définit, non seulement une durée d'humectation mais aussi l'évolution de cette dernière en fonction de la hauteur dans le couvert végétal. Néanmoins, ces types de modèle sont très complexes.

3.3. Présentation du modèle retenu

Le modèle SWEB (**S**urface **W**etness **E**nergy **B**alance) a été créé par Roger Magarey, Joe Russo et Bob Seem en 1999 de l'université de Cornell aux Etats-Unis (Magarey, 1999; Magarey et al., 2006a; Magarey et al., 2005a). Le modèle est composé de quatre modules : *i)* le bilan d'eau du couvert (Figure II-1-2a) ; *ii)* le bilan d'énergie calculé à l'échelle du couvert[3] (Figure II-1-2b); *iii)* le coefficient de transfert aérodynamique (Figure II-1-2c); *iv)* le module de la distribution de l'eau à la surface du couvert (Figure II-1-2d).

Le modèle SWEB a été calibré en laboratoire sous conditions contrôlées et a été ensuite testé sur un jeu de données extensives sur quatre variétés de grappes de vignes à Geneva, New York (Magarey, 1999) puis a été validé dans un champ viticole aux Etats-Unis sur les variétés "Chardonnay" et "Concord" et sur la variété "Cabernet franc" en Australie (Magarey, 1999; Magarey et al., 2006b). Les paramètres, les équations et les différentes étapes de la simulation de la durée d'humectation par le modèle sont représentés dans la figure suivante et dans les annexes (Annexe D et E). Les données d'entrée du modèle sont représentées en annexes (Annexe F).

[3] The SWEB model is based on the "big leaf" concept (Magarey, 1999; Magarey et al., 2005, Magarey et al., 2006a,b). The model assumes the canopy is a "big leaf". The model was developed at the organ scale and it simulates the surface wetness duration on a leaf. The water storage capacity is based on the properties of a single leaf scaled up to that of a canopy.

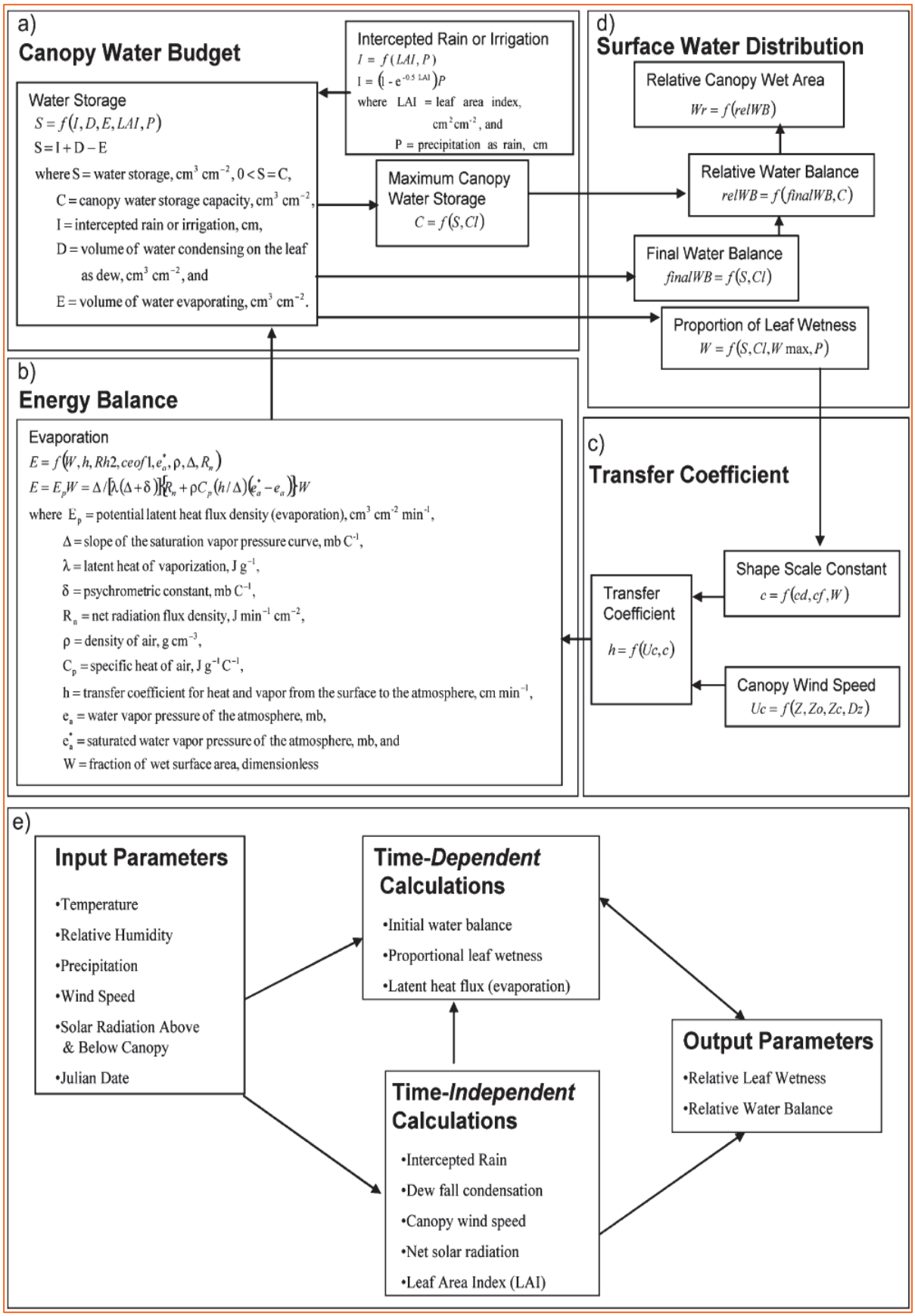


Figure II-1-2. Les paramètres, les équations et la structure du modèle SWEB (Rizzo et al., 2006).
Equations and model structure of the SWEB canopy model (Rizzo et al., 2006).

3.4. Avantages du modèle retenu

Le modèle SWEB est une approche simple de modélisation d'un bilan hydrique à l'échelle du couvert. En revanche les modèles multicouches (Thompson, 1982 ; Norman, 1983 ; Huber, 1988 ; Huber et Itier, 1990 ; Butler et al. 1986) exigent des modifications chaque fois qu'ils sont appliqués à d'autres cultures. Le modèle sélectionné offre certains avantages par rapport aux autres pour la détermination de la durée d'humectation :

- le modèle est simple : il n'utilise pas beaucoup de paramètres d'entrée
- le modèle simule la durée d'humectation due à la pluie et/ou à la rosée ;
- l'adaptation du modèle à l'échelle de la feuille ou du couvert et à d'autres cultures;
- le modèle a été validé et calibré dans des conditions contrôlées et en plein champs ainsi que son application dans différentes zones géographiques.
- la durée d'humectation pourrait être définie seulement à partir des données météorologiques et des paramètres du couvert ;
- les événements antérieurs de la durée d'humectation peuvent être obtenus à partir des données historiques.

3.5. Application du modèle SWEB dans d'autres régions

Le modèle SWEB a été calibré pour l'évaporation des gouttes et des films d'eau dans des conditions atmosphériques et radiatives contrôlées en laboratoire. Le modèle a été utilisé, validé et intégré dans un système agrométéorologique de prévision du *Plasmopara viticola* (maladie de vigne) par des chercheurs dans la région Friuli Venezia Giulia en Italie (Cicogna et al., 2005; Dalla Marta et al., 2007a; Dalla Marta et al., 2007b; Dalla Marta et al., 2005b).

L'adaptation du modèle SWEB pour d'autres cultures que les grappes de vigne est notre objectif. Le modèle SWEB peut être adapté aux caractéristiques physiques particulières d'autres cultures en ajustant les quatre paramètres suivants : la hauteur de la culture (crop height), l'indice foliaire *LAI,* la quantité d'eau maximale stockée par unité de surface C_1 (maximum water storage per unit area) et la fraction maximale de la surface du couvert susceptible d'être mouillée (maximum fraction of canopy allowed as wet surface area), W_{max}[4].

[4] The factor W_{max} could be estimated by quantitative techniques, but we also suggest a simple method for approximation. When a leaf surface is wettable, it favors water distribution as a film. When a leaf surface is non-wettable, it favors water distribution as drops. A simple technique for determining W_{max} in terms of leaf wettability is to partition the canopy leaf area into wettable and nonwettable fractions and then assign a proportion of maximum wet area to each fraction (Annexe D, equation (5)).

La hauteur de la culture et l'indice foliaire (*LAI*) peuvent être facilement mesurés ou estimés à partir de modèles de croissance de culture (Mahfouf et Jacquemin, 1989). Les valeurs de C_1 peuvent être facilement déterminées en laboratoire.

3.6. Intégration du modèle SWEB dans les systèmes de prévision des risques épidémiques

Le modèle SWEB a été utilisé par plusieurs chercheurs pour différentes cultures et dans différentes régions (Cicogna et al., 2005; Dalla Marta et al., 2005b; Orlandini et al., 2008). Le modèle a été intégré dans un système de prévision de mildiou de la vigne (*Plasmopora viticola*).
Ce système permet donc la mise en place d'un outil de prévision du risque de développement des maladies applicable à l'échelle territoriale.

Enfin, le modèle SWEB a été traduit dans un certain nombre de langages informatiques (Rizzo et al., 2006) : MATLAB (Mathworks Inc., Natick, MA-Version 6.1), STELLA (High Performance Systems, Inc., Lebanon, NH-Version 5.0), Berkley Madonna (Macey and Oster, Berkeley, CA-Version 7.0.2), GoldSim Pro (GoldSim Technology Group, Redmond, WA-Version 7.51.100), Simulink (Mathworks Inc., Natick, MA-Version 4.1.2.4). La version originale du modèle (SWEB Model 0.28) a été réalisée dans le logiciel Microsoft Excel.
Le modèle a été également implémenté dans l'environnement Windows sous la forme du software SEMoLa[5].

4. LES FACTEURS FAVORISANT L'INFECTION ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA SEPTORIOSE

Les conditions météorologiques exercent une influence déterminante sur les maladies fongiques des plantes (Huber et Gillespie, 1992). La réussite des différentes phases d'une épidémie dépend étroitement d'événements microclimatiques précis. Les phases d'infection et de latence sont liées de manière essentielle aux facteurs température, humidité relative et en particulier à la durée d'humectation qui joue un rôle déterminant.

La connaissance de l'effet des conditions climatiques sur les paramètres épidémiologiques (efficacité d'infection, période de latence, taux de sporulation) est nécessaire à la prévision

[5] Environnement SEMoLa software qui permet au modèle d'être utilisé facilement sur un ordinateur. (http://www.dpvta.uniud.it/~Danuso/docs/Semola/homep.htm).

des risques épidémiques. La température, l'humidité relative et le rayonnement avant et après inoculation peuvent influencer considérablement la réaction des maladies foliaires des céréales (De Vallavieille-Pope et al., 2000). Parmi ces facteurs, l'humectation, en particulier la durée de l'humectation, se classe comme étant le facteur dominant suivi de la température (Huber et Gillespie, 1992). La durée d'humectation nécessaire à la germination et à la pénétration de champignon dans l'hôte dépend de la température.

La plupart des modèles de simulation de la prévision des risques d'épidémie de septoriose développés jusqu'à présent se basent sur l'interaction ou la corrélation entre les facteurs météorologiques et les différentes composantes du cycle épidémique (inoculation, libération, dissémination, germination, incubation, latence, sporulation, …). Dans la littérature on peut citer les travaux de Shearer et Zadoks (1974), Shaner et Finney (1976), Cook (1977), Bahat et al. (1980), Tyldesley et Thompson (1980), Coakley et al. (1985), Hansen et al. (1994), Moreau et Maraite (1999) et Pietravalle et al. (2003).
A la différence de la pluie et de la température, le vent n'a pas d'effet significatif sur l'épidémie de la septoriose (Pietravalle et al., 2003; Rapilly, 1991).

Nous nous limitons dans ce paragraphe à quelques travaux récents sur l'effet de la température, de la pluie et de la durée d'humectation sur la réussite de la contamination afin de définir les conditions minimales d'infection de *S. tritici* sur les feuilles de blé d'hiver. Les conditions d'humectation ainsi définies seront comparées à celles déterminées par le modèle SWEB.

4.1. La pluie

Dans des régions à climats tempérés, beaucoup de chercheurs ont montré que le développement de la maladie est davantage influencé par la pluie que par la température. L'épidémie de *S. tritici* dépend en grande partie de la pluie durant la période de croissance (Shaw et Royle, 1993 ; Tyldesley et Thompson, 1980 ; Hansen et al., 1994). En effet, une fois que les feuilles sont infectées, des précipitations suivies d'une humidité relative élevée favorisent le déclenchement de l'épidémie (Coakley et al., 1985; Hess et Shaner, 1987a, b; Khoury et Kranz, 1989; Murray et al., 1990; Pietravalle et al., 2003; Rapilly et Jolivet 1976; Thomas et al., 1989; Tyldesley et Thompson, 1980). Ces auteurs ont également montré que, si les conditions d'infection sont réunies pendant l'hiver, la pluie au début de l'extension de la tige devient critique.

Pour mieux définir les conditions favorisant le développement de la septoriose, Shaner et Finney (1976) ont comparé les effets des précipitations et ceux des températures sur la sévérité de la septoriose du blé d'hiver dans la région de Lafayette (Indiana). Les auteurs ont observé que les feuilles ont été sévèrement attaquées lorsqu'il y avait au moins 40 jours de précipitations entre le 1er avril et le 17 juin. En analysant au 10 mai les données de 40 jours de pluie précédentes et en utilisant une prévision de pluie pour les 35 jours suivants, il serait possible de déterminer les périodes sévères de l'épidémie sur les dernières feuilles formées. Pour cette raison aussi, Coakley et al. (1985) ont quantifié la relation entre la sévérité de la maladie et les jours de pluie afin de développer un modèle pour la prévision de la septoriose. Ils ont mis en évidence une corrélation négative entre la sévérité de *S. tritici* et la fréquence des jours consécutifs sans pluie entre fin mars et début mai.

De nombreux modèles d'infection se basant sur la pluie ont été développés en Europe :

- Au Danemark, par exemple, le nombre de jours de pluie avec au moins un millimètre de précipitations après le stade GS 32 (Tottman, 1987) a été utilisé (Jørgensen et al., 1996). Le nombre de jours avec plus d'un millimètre de pluie, calculé durant une période de 30 jours à partir du stade GS 32 (Zadoks et al., 1974) a été bien corrélé à l'épidémie de *Septoria spp*. Sept ou huit jours de pluie supérieure à 1 mm a été considéré comme un seuil de traitement fongicide (Hansen et al., 1994).

- En Belgique, Moreau et Maraite (1999), pour mieux simuler les périodes d'infection de *S. tritici* au sud de la Belgique, ont utilisé un seuil minimum de 0.1 mm de pluie (en première heure de la pluie) pour préparer les pycnides et 0.5 mm (en seconde heure) pour l'éclaboussure de ces pycnides.

- En Angleterre, le centre de recherche ADAS[6] (Cook, 1977; King et al., 1983) a montré différentes possibilités pour identifier la période d'infection pour *Septoria spp*. :

  - un cumul d'au moins 10 mm sur 3 ou 4 jours de pluie (avec de la pluie le 1er jour) ;

  - un cumul de 5 mm sur trois jours consécutifs de précipitations ;

  - 4 jours consécutifs de précipitations ;

  - une période de 16 heures débutant avec des précipitations et suivies avec des conditions d'humidité relative ≥ 90% et avec au moins 5 mm de pluie.

[6] Agricultural Development And Advisory Service. UK

4.2. La température

L'étude de l'effet de la température sur le développement de la septoriose a fait depuis longtemps l'objet d'études de plusieurs chercheurs. Weber (1922) a trouvé que les températures optimales à la germination des spores étaient de 22-24°C. L'infection et le développement de *S. tritici* sont beaucoup plus réduits à des températures basses (Renfro et Young, 1956). Shipton et al. (1971) ont suggéré comme températures optimales, 20-24°C pour le développement de l'épidémie. Bahat et al. (1980) ont développé une fonction pour analyser la contribution des facteurs météorologiques et la progression de la sévérité de la maladie. Dans cette méthode la sévérité de la maladie a été corrélée à un indice de température (12-25°C) calculé pour une période de 7 à 21 jours après l'observation de la maladie. Coakley et al. (1985), sur base de 12 ans de données, ont constaté que la fréquence des jours consécutifs de températures ≤ 7°C à la fin du tallage et au début de l'extension de la tige a été négativement corrélée à la sévérité de *S. tritici*. Parker et al. (1999) ont montré une corrélation négative entre la sévérité de *S. tritici* sur la feuille F2 et les fréquences des jours avec des températures ≤ -2°C de début novembre à la mi-décembre. Ils ont également trouvé une corrélation négative, mais moins significative, avec la fréquence des jours à températures ≤ 7°C pour la même période. Dans d'autres études plus récentes (Pietravalle et al., 2003), trois seuils de température -2°C, 0, et 7°C ont été utilisés pour la prévision de *S. tritici* en Angleterre. Les corrélations négatives les plus importantes ont été obtenues pour le seuil de 7°C.

D'autres études ont montré que la température est un facteur important dans la détermination de la période de latence et que la sévérité de la maladie augmente avec l'augmentation de la température d'incubation (Chungu et al., 2001; Hess et Shaner, 1987a; Magboul et al., 1992; Shaw, 1990).

4.3. Importance de l'humectation

Depuis les années 1950 la durée d'humectation a été utilisée comme variable pour la prévision des risques épidémiques (Magarey et Sutton, 2007). La présence d'eau libre sur les organes végétaux est très souvent une condition indispensable à la phase de contamination. La durée d'humectation joue un rôle déterminant sur les phases de contamination de l'hôte par de nombreux champignons pathogènes (Huber et Gillespie, 1992). C'est le cas notamment des

maladies foliaires des céréales au G-D de Luxembourg comme la septoriose, les rouilles et l'oïdium qui sévissent sur le feuillage (El Jarroudi, 2005; El Jarroudi et al., 2009).

L'humectation influence les champignons durant la production et le transport de l'inoculum. Plusieurs auteurs ont décrit, ces dernières décennies, l'effet de la durée d'humectation sur la germination, l'infection et la sporulation (Chungu et al., 2001; Eriksen et Munk, 2003; Mathieu et Kushalappa, 1993; Shaw, 1990). L'humectation joue un rôle important durant toutes les phases du cycle épidémique (Shaner et Finney, 1976). La température et la durée d'humectation influencent la vitesse de développement et la sévérité de la maladie (Magboul et al., 1992). L'effet de la température, de la durée d'humectation et de la variété sur la période de latence de *S. tritici* du blé d'hiver a été étudié par Shaw (1991a) et Shaw et Royle (1993) qui ont montré que la période de latence dépend de la température et que la durée d'humectation ne semble jamais avoir d'effet significatif sur la latence.

Bien que l'effet de la relation entre les conditions météorologiques et le développement de la septoriose (Hess et Shaner, 1987a, b; Shaw, 1990) soit connu, il existe néanmoins peu d'information sur l'interaction entre la concentration de l'inoculum, la température et l'humectation durant les processus d'infection. Chungu et al. (2001) ont étudié l'effet de la température d'incubation, de la durée d'humectation, de la concentration de l'inoculum et de leur interaction avec la durée d'humectation sur le développement de la septoriose en déterminant ainsi les conditions optimales de la réaction de la septoriose à l'égard de ces facteurs. Les auteurs ont remarqué que le pourcentage de la septoriose augmente lorsque la durée d'humectation passe de 48 à 72 heures ce qui s'accorde avec des résultats antérieurs d'autres chercheurs (Hess et Shaner, 1987a; Magboul et al., 1992).

L'effet des périodes d'interruption (interrupted period) des conditions favorables à l'infection sur différentes cultures fut étudié par plusieurs auteurs sur différentes surfaces et organes végétaux. Pour la culture du blé, les périodes humides dans des conditions réelles ne sont pas toujours continues et peuvent être interrompues par des périodes sèches courtes, particulièrement après la pluie (De Vallavieille-Pope et al., 1995; Shaw, 1991b).

L'existence des périodes d'interruption est un élément important dans l'évaluation des risques d'infection par *S. tritici* (Shaw, 1991a). *Septoria tritici* exige de longues périodes à 100% d'humidité relative pour réussir l'infection des feuilles de blé d'hiver par ses conidies. Une période d'interruption allant jusqu'à 48 heures à 75% d'humidité relative ne réduit pas

nécessairement l'infection tandis que des périodes à 50% d'humidité relative ont un grand effet sur l'infection. En outre, des longues périodes non-humides entre les périodes humides ne réduisent pas nécessairement l'infection. Le pathogène est bien adapté pour exploiter les périodes d'humectation discontinues. Pour diminuer considérablement la probabilité d'infections, les périodes d'interruption (sèches) doivent avoir une humidité relative inférieure à 75%.

5. CONCLUSIONS

Les conclusions tirées au terme de cette étude sont :

Concernant les capteurs et les modèles de l'humectation :

- L'absence de standardisation des capteurs pour la mesure de la durée d'humectation est un facteur limitant pour leur utilisation dans le domaine de la prévision des risques épidémiques.

- Les modèles de détermination de la durée d'humectation présentent une alternative aux capteurs d'humectation. De nombreux modèles ont été développés. Le modèle à potentialité opérationnelle doit utiliser des paramètres simples et le modèle doit simuler à la fois l'humectation due à la pluie et à la rosée. Le modèle que nous avons cherché dans ce travail est conçu pour être utilisé à partir des données d'entrées à l'échelle du couvert.

- La récolte de données météorologiques à l'échelle du couvert est une tâche difficile pour l'implémentation de la plupart des modèles d'humectation. Une amélioration des modèles qui prendraient en compte les différentes interactions entre les conditions d'infection des maladies fongiques serait souhaitable. Le modèle devrait être aussi facilement intégré dans les systèmes d'avertissement agricole.

Concernant l'épidémie de la septoriose :

- La septoriose, principale maladie affectant les feuilles de blé d'hiver est fortement dépendante des conditions météorologiques locales. La connaissance quantitative des conditions climatiques favorisant l'infection de septoriose est essentielle pour comprendre et contrôler le développement de l'épidémie.

- Les conditions nécessaires à l'infection par la septoriose, rapportées dans la bibliographie, sont trop vagues et trop peu claires pour être facilement intégrées dans les modèles de prévision des risques épidémiques. En outre, il est également difficile de définir le processus principal du mouvement d'inoculum dans le couvert.

- Il est peu probable d'arriver à définir une période d'infection pour *S. tritici* en terme de période d'humectation continue, puisque les longues périodes sèches entre les périodes humides ne réduisent pas nécessairement l'infection. Les manières dont le pathogène se sert des périodes l'humectation intermittentes pendant la germination et l'infection des spores semblent être peu connues. La littérature montre une diversité dans les résultats obtenus. En conditions contrôlées, il existe une infinité de possibilités de combinaison des conditions de température et d'humectation (continue ou discontinue). Ces possibilités d'interactions rendent difficile la définition exacte des conditions d'infection au champ.

LISTE DES FIGURES

Figure II-1-1. Le modèle du bilan énergétique 94
Figure II-1-2. Les paramètres, les équations et la structure du modèle SWEB 97

RÉFÉRENCES

Armstrong, R., Barthakur, N. N., and Norris, E. (1993). A comparative study of three leaf wetness sensors. *International Journal of Biometeorology* **37**, 7-10.

Bahat, A., Hane, G., Brown, M. B., and Ayal, Z. (1980). Factors affecting the vertical progression of *septoria* leaf blotch in short-statured wheats. *Phytopathology* **70**, 179-184.

Barr, A., and Gillespie, T. J. (1987). Maximum wetness duration for water drops on leaves in the field. *Agricultural and Forest Meteorology* **41**, 267-274.

Bouten, W., Swart, P. J. F., and De Water, E. (1991). Microwave transmission, a new tool in forest hydrological research. *Journal of Hydrology* **124**, 119-130.

Brain, P., and Butler, D. R. (1985). A model of drop size distribution for a system with evaporation. *Plant, Cell and Environment* **8**, 247-252.

Butler, D. R. (1980). Dew and thermal lag: Measurements and an estimate of wetness duration on cocoa pods. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **106**, 539-550.

Butler, D. R. (1985). The energy balance of water drops on a leaf surface. *Boundary-Layer Meteorology* **32**, 337-349.

Butler, D. R. (1986). Evaporation from rain drops on leaves in a cereal canopy: a simulation model. *Boundary-Layer Meteorology* **36**, 39-51.

Butler, D. R. (1990). Mass transfer from discrete water drops on a cereal canopy. *Boundary-Layer Meteorology* **53**, 33-42.

Butt, D. J., and McGlinn, C. V. (1989). Tests of surface wetness sensors used with electronic disease-warning instruments. p. 57-64. *In* C. Gessler et al. (ed.) Integrated control of pome fruit diseases. Proc. 2nd. Workshop Vol. II., Brissago, Switzerland, 30 Oct.-4 Nov. 1988, IOBC/WPRS Bulletin 1989/XII/6.

Chtioui, Y., Franc, L. J., and Panigrahi, S. (1999). Moisture prediction from simple micrometeorological data. *Phytopathology* **88**, 668-672.

Chungu, C., Gilbert, J., and Townley-Smith, F. (2001). *Septoria tritici* blotch development as affected by temperature, duration of leaf wetness, inoculum concentration, and host. *Plant Disease* **85**, 430-435.

Cicogna, A., Dietrich, S., Gani, M., Giovanardi, R., and Sandra, M. (2005). Use of meteorological radar to estimate leaf wetness as data input for application of territorial epidemiological model (downy mildew-*Plasmopara viticola*). *Physics and Chemistry of the Earth* **30**, 201-207.

Coakley, S. M., Mc Daniel, L. R., and Shaner, G. (1985). Model for predicting severity of *Septoria tritici* blotch on winter wheat. *Phytopathology* **75**, 1245-1251.

Cook, R. J. (1977). Effect of timed fungicide sprays on yield of winter wheat in relation to *Septoria tritici* infection periods. *Plant Pathology* **26**, 30-34.

Crowe, M. J., Coakley, S. M., and Emge, R. G. (1978). Forecasting dew duration at Pendleton, Oregon, using simple weather observations *J. Appl. Meteorol.* **17**, 1482-1487.

Dalla Marta, A., De Vincenzi, M., Dietrich, S., and Orlandini, S. (2005a). Neural network for the estimation of leaf wetness duration: application to a *Plasmopara viticola* infection forecasting. *Physics and Chemistry of the Earth* **30**, 91-96.

Dalla Marta, A., Gani, M., Cicogna, A., Dietrich, S., Orlandini, S., and Santorelli, E. (2007a). Transboundary system for grapevine downy mildew risk evaluation on a territorial scale (P. Rada project). *Bulletin OEPV/EPPO* **37**, 290-294.

Dalla Marta, A., Magarey, R. D., Martinelli, L., and Orlandini, S. (2007b). Leaf wetness duration in sunflower (*Helianthus annuus*): Analysis of observations, measurements and simulations. *European Journal of Agronomy* **26**, 310-316.

Dalla Marta, A., Magarey, R. D., and Orlandini, S. (2005b). Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 84-95.

Dalla Marta, A., Martinelli, L., and Orlandini, S. (2008). Leaf wetness spatial variability within grapevine canopy. *American*

Journal of Enology and Viticulture **59**, 78-82.

De Vallavieille-Pope, C., Giosuc, S., Munk, L., Newton, A. C., Niks, R. E., Ostergard, H., Pons-Kuhnemann, J., Rossi, V., and Sache, I. (2000). Assessment of epidemiological parameters and their use in epidemiological and forecasting models of cereal airborne disease. *Agronomie* **20**, 715-727.

De Vallavieille-Pope, C., Huber, L., Leconte, M., and Goyeau, H. (1995). Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration, and infection of *Puccinia-recondita f sp tritici* and *P-striiformis* on wheat seedlings. *Phytopathology* **85**, 409-415.

Deshpande, R. Y., Hubbard, K. G., Coyne, D. P., Steadman, J. R., and Pankhurst, A. M. (1995). Estimating leaf wetness in dry bean canopies as a prerequisite to evaluating white mold disease. *Agronomy journal* **87**, 613-619.

Detrixhe, P., Chandelier, A., Cavelier, M., Buffet, D., and Oger, R. (2003). Development of an agrometeorological model integrating leaf wetness duration estimation to assess the risk of head blight infection in wheat. *Aspects of Applied Biology* **68**, 199-204.

El Jarroudi, M. (2005). Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au G-D de Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision. *Thèse de Doctorat, Université de Liège*.

El Jarroudi, M., Delfosse, P., Maraite, H., Hoffmann, L., and Tychon, B. (2009). Assessing the accuracy of simulation model for *septoria* Leaf blotch disease progress on winter wheat. *Plant Disease* **93**, 983-992.

Eriksen, L., and Munk, L. (2003). The occurrence of *Mycosphaerella graminicola* and its anamorph *Septoria tritici* in winter wheat during the growing season. *European Journal of Plant Pathology* **109**, 253-259.

Fitt, B. D. L., McCartney, H. A., and Walklate, P. J. (1989). The role of rain in dispersal of pathogen inoculum. *Annual Review of Phytopathology* **27**, 241-270.

Francl, L. J., and Panigrahi, S. (1997). Artificial neural network models of wheat leaf wetness. *Agricultural and Forest Meteorology* **88**, 57-65.

Galliani, G., and Screpanti, F. (1993). A model to estimate leaf-wetness duration using standard weather-station data. *International journal of modelling and simulation* **13**, 167-171.

Garratt, J. R., and Segal, M. (1988). On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. *Boundary-Layer Meteorology* **45**, 209-236.

Geagea, L., Huber, L., Sache, I., Flura, D., McCartney, H. A., and Fitt, B. D. L. (2000). Influence of simulated rain on dispersal of rust spores from infected wheat seedlings. *Agricultural and Forest Meteorology* **101**, 53-66.

Getz, R. R. (1992). Report on the Measurement of Leaf Wetness. *WMO Publication, Geneva*.

Gillespie, T. J., and Barr, A. (1984). Adaptation of a dew estimation scheme to a new crop and site. *Agricultural and Forest Meteorology* **31**, 289-295.

Gillespie, T. J., Brisco, B., Brown, R. J., and Sofko, G. J. (1990). Radar detection of dew event in wheat. *Remote Sensing of Environment* **33**, 151-156.

Gillespie, T. J., and Kidd, G. E. (1978). Sensing duration of leaf moisture retention using electrical impedance grids. *Can. J. Pl. Sci* **58**, 179-187.

Gleason, M. L., Taylor, S. E., Loughin, T. M., and Koehler, K. J. (1994). Development and validation of an empirical-model to estimate the duration of dew periods. *Plant Disease* **78**, 1011-1016.

Häckel, H. (1980). New aspects on an electrical method for measuring the wetness duration immediately on leaves. *Agricultural Meteorology* **22**, 113-119.

Hall, F. R., Downer, R. A., Cooper, J. A., Ebert, T. A., and Ferree, D. C. (1997). Changes in spray retention by apple leaves during the growing season. *HortScience* **32**, 858-860.

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

Hess, D. E., and Shaner, G. (1987a). Effect of moisture and temperature on development of *Septoria tritici* blotch in wheat. *Phytopathology* **77**, 215-219.

Hess, D. E., and Shaner, G. (1987b). Effect of moisture on *Septoria tritici* blotch development on wheat in the field. *Phytopathology* **77**, 220-226.

Hirst, J. M. (1954). A method for recording the formation and persistence of water deposits on plant shoots. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **80**, 227-231.

Hoppmann, D., and Wittich, K. P. (1997). Epidemiology-related modelling of the

leaf-wetness duration as an alternative to measurements, taking *Plasmopara viticola* as an example. *Zeitschrift Fur Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz-Journal of Plant Diseases and Protection* **104**, 533-544.

Huband, N. D. S., and Butler, D. R. (1984). A comparison of wetness sensors for use with compture or microprocessor systems disease forecasting. *British crop protection Conference - Pests and Diseases* **II**, 633-638.

Huber, L. (1988). Modèle de simulation de la durée d'humectation des feuilles au champ après une pluie. Cas d'un couvert homogène. *Agronomie* **8**, 675-684.

Huber, L. (1992). Déterminisme et mesure de la durée d'humectation en vue de la protection des plantes. *Agronomie* **12**, 281-295.

Huber, L., Flura, D., Durand, B., and Clerjeau, M. (1991). Etude micrométéorologique de la durée d'humectation des grappes de vigne. *Bulletin OEPV/EPPO* **21**, 441-449.

Huber, L., and Gillespie, T. J. (1992). Modeling leaf wetness in relation to plant-disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology* **30**, 553-577.

Huber, L., and Itier, B. (1990). Leaf wetness duration in a field bean canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* **51**, 281-292.

Huber, L., McCartney, H. A., and Fitt, B. D. L. (1997). Influence of target characteristics on the amount of water splashed by impacting drops. *Agricultural and Forest Meteorology* **87**, 201-211.

Jones, A. L. (1986). Role of wet periods in predicting foliar diseases. *In : Plant disease epidemiology. Population dynamics and management (KJ Leonard, WE Fry, eds) I, 87-100.*

Jørgensen, L. N., Secher, B. J. M., and Nielsen, G. C. (1996). Monitoring diseases of winter wheat on both a field and a national level in Denmark. *Crop Protection* **15**, 383-390.

Khoury, W., and Kranz, J. (1989). Comparative studies on the influence of weather variables on disease progress rate of some cereal diseases. *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent* **54**, 545-554.

King, J. E., Cook, R. J., and Melville, S. C. (1983). A review of *Septoria* diseases of wheat and barley. *Ann. Appl. Biol.* **103**, 345-373.

Krause, R. A., Massie, L. B., and Hyre, R. A. (1975). BLITECAST: a computerized forecast of potato late blight. *Plant Disease Reporter* **59**, 95-98.

LeClerc, M. Y., Thurtell, G. W., and Gillespie, T. J. (1985). Laboratory simulation of evaporation of water droplets on artifical soybean leaves. *Agric. For. Meteorol.* **36**, 105-111.

Linacre, E. (1992). Climate data and resources. Routledge, London, UK.

Lomas, J. (1991). Sprinkler irrigation and plant disease under semi-arid climatic conditions. *Bulletin OEPV/EPPO* **21**, 365-370.

Lomas, J., and Shashoua, Y. (1970). The performance of three types of leaf wetness recorders. *Agricultural Meteorology* **7**, 159-166.

Lovell, D. J., Parker, S. R., Hunter, T., Royle, D. J., and Coker, R. R. (1997). Influence of crop growth and structure onto the risk of epidemics by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) in winter wheat. *Plant Pathology* **46**, 126-138.

Lulu, J., Sentelhas, P. C., Pedro, M. J., Pezzopane, J. R. M., and Blain, G. C. (2008). Spatial variability of leaf wetness duration in a 'niagara rosada' vineyard. *Engenharia Agricola* **28**, 104-114.

Madden, L., Pennypacker, S. P., and MacNab, A. A. (1978). FAST, a Forecast System for *Alternaria solani* on tomato. *Phytopathology* **68** 1354-1358.

Magarey, R. D. (1999). A theoretical standard for surface wetness estimation. *Ph.D. Diss. Cornell University, Ithaca, NY.*

Magarey, R. D., Russo, J. M., and Seem, R. C. (2006a). Simulation of surface wetness with a water budget and energy balance approach. *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 373-381.

Magarey, R. D., Russo, J. M., Seem, R. C., and Gadoury, D. M. (2005a). Surface wetness duration under controlled environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **128**, 111-122.

Magarey, R. D., Seem, R. C., and Russo, J. M. (2006b). Grape canopy surface wetness: Simulation versus visualization and measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 361-372.

Magarey, R. D., and Sutton, T. B. (2007). How to create and deploy infection models for plant pathogens. In: Ciancio, A., and Mukerji, K.G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer,

ISBN 1402060602, 9781402060601. 359 pages.

Magarey, R. D., Weiss, A., Gillespie, T. J., Huber, L., and Seem, R. C. (2005b). Estimating surface wetness on plants. In: Hatfield, J.L., Baker, J.M., Viney, M.K. (Eds.), Micrometeorological measurements in Agricultural systems. *American Society of Agronomy, Madison, WI*.

Magboul, A. M., Gengs, S., Gilchrist, D. G., and Jackson, L. F. (1992). Environmental influence on the infection of wheat by *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology* **82**, 1407-1413.

Mahfouf, J., and Jacquemin, B. (1989). A study of rainfall interception using a land surface parameterization for mesoscale meteorological models *Journal Applied Meteorology* **28**, 1282-1302.

Mahtour, A., El Jarroudi, M., Giraud, F., Delfosse, P., Huber, L., Hoffmann, L., and Tychon, B. (2010). Spatial heterogeneity of leaf wetness duration in winter wheat canopy and its influence on plant disease epidemiology. *Phytopathology* **100**, S76.

Mathieu, D., and Kushalappa, A. C. (1993). Effects of temperature and leaf wetness duration on the infection of celery by *Septoria apiicola*. *Phytopathology* **83**, 1036-1040.

Monteith, J. L. (1957). Dew *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **83**, 322-41.

Monteith, J. L., and Butler, D. R. (1979). Dew and thermal lag: a model for cocoa pods. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **105**, 207-215.

Moreau, J. M., and Maraite, H. (1999). Integration of knowledge on wheat phenology and *Septoria tritici* epidemiology into a disease risk simulation model validated in Belgium. *Aspects of Applied Biology* **55**, 1-6.

Murray, G. M., Martin, R. H., and Cullis, B. R. (1990). Relationship of the severity of *Septoria tritici* blotch of wheat to sowing time, rainfall at heading and average susceptibility of wheat cultivars in the area. *Australian Journal of Agriculture* **41**, 307-315.

Norman, J. M., and Campbell, G. (1983). Application of a plant environment model to problems in the environment. *Adv. Irrigation.* **2**, 155-188.

Orlandini, S., Massetti, L., and Marta, A. D. (2008). An agrometeorological approach for the simulation of *Plasmopara viticola*. *Computers and Electronics in Agriculture* **64**, 149-161.

Papastamati, K., McCartney, H. A., and van den Bosch, F. (2004). Modelling leaf wetness duration during the rosette stage of oilseed rape. *Agricultural and Forest Meteorology* **123**, 69-78.

Parker, S. R., Lovell, D. J., Royle, D. J., and Paveley, N. D. (1999). Analysing epidemics of *Septoria tritici* for improved estimates of disease risk. *In: Lucas JA, Bowyer P, Anderson HM ed. Septoria on cereals: a study of pathosystems. CABI publishing, Wallingford. pp. 96-107.*

Payen, D. (1983). Modelisation de l'epidemiologie de *Sclerotinia sclerotiorum* sur tournesol. *Bulletin OEPV/EPPO* **13**, 272-281.

Pedro, M. J., and Gillespie, T. J. (1982a). Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agricultural Meteorology* **25**, 283-296.

Pedro, M. J., and Gillespie, T. J. (1982b). Estimating dew duration. II. Utilizing standard weather station data. *Agricultural Meteorology* **25**, 297-310.

Penrose, L. J., and Nicol, H. J. (1996). Aspects of microclimate variation within apple tree canopies and between sites in relation to potential *Venturia inequalis* infection. *New Zeal. J. Crop Hort. Sci.* **24**, 259-266.

Pietravalle, S., Shaw, M. W., Parker, S. R., and van den Bosch, F. (2003). Modeling of relationships between wheather and *Septoria tritici* epidemics on winter wheat: acritical approach. *Phytopathology* **93**, 1329-1339.

Potratz, K. J., Gleason, M. L., Hockmuth, M. L., Parker, S. K., and Pearston, G. A. (1994). Testing the accuracy and precision of wetness sensors in a tomato field and turfgrass. *J. Iowa Acad. Sci.* **101**, 56-60.

Rao, P. S., Gillespie, T. J., and Schaafsma, A. W. (1998). Estimating wetness duration on maize ears from meteorological observations. *Canadian Journal of Soil Science* **78**, 149-154.

Rapilly, F. (1991). Epidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. *In* "Epidémiologie en pathologie végétale" (L. T. Doc, ed.), pp. 240-261. Institut National de la Recherche Agronomique INRA. ISBN 2-7380-0297-8. 317 p, Paris.

Rapilly, F., and Jolivet , E. (1976). Construction d'un modèle (EPISEPT) permettant la simulation d'une épidémie de *Septoria nodorum* Berk. sur blé. *Revue de statistique appliquée* **24**, 31-60.

Renfro, B. L., and Young, H. C. J. (1956). Techniques for studying varietal response to *Septoria* leaf blotch of wheat. *Phytopathology* **46**, 23-24.

Rizzo, D. M., Mouser, P. J., Whitney, D. H., Mark, C. D., Magarey, R. D., and Voinov, A. A. (2006). The comparison of four dynamic systems-based software packages: Translation and sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software* **21**, 1491-1502.

Rotem, J., and Palti, J. (1969). Irrigation and plant diseases. *Ann Rev Phytopathol* **7**, 267-288.

Royle, D. J., and Butler, D. R. (1986). Epidemiological significance of liquid water in crop canopies and its role in disease forecasting. p. 139-156. *In* P.G. Ayres, L. Boddy (eds). Water, fungi and plants. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Sabatini, F., Dalla Marta, A., Orlandini, S., and Zanchi, C. A. (2005). Review of leaf wetness duration sensors. In: Dalla Marta, A., Magarey, R. D., And Orlandini, S. (2005). Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 84-95.

Saint-Jean, S., Chelle, M., and Huber, L. (2004). Modelling water transfer by rain-splash in a 3D canopy using Monte Carlo integration. *Agricultural and Forest Meteorology* **121** 183-196.

Santos, E. A., Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., and Lulu, J. (2008a). Performance of cylindrical leaf wetness duration sensors in a tropical climate condition. *Scientia Agricola* **65**, 1-9.

Santos, E. A., Sentelhas, P. C., Pezzopane, J. E. M., Angelocci, L. R., and Monteiro, J. (2008b). Spatial variability of leaf wetness duration in cotton, coffee and banana crop canopies. *Scientia Agricola* **65**, 18-25.

Schmitz, H. F., and Grant, R. H. (2009). Precipitation and dew in a soybean canopy: Spatial variations in leaf wetness and implications for Phakopsora pachyrhizi infection. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**, 1621-1627.

Schurer, K., and van der Wal, A. F. (1972). An electronic leaf wetness recorder. *European Journal of Plant Pathology* **78**, 29-32.

Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Batzer, J. C., Gleason, M. L., Monteiro, J., Pezzopane, J. R. M., and Pedro, M. J. (2005). Spatial variability of leaf wetness duration in different crop canopies. *International Journal of Biometeorology* **49**, 363-370.

Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Monteiro, J. E. B. A., and Rowlandson, T. L. (2004). Estimating leaf wetness duration on a cotton crop from meteorological data. *Revista Brasileira de agrometeorologia* **12**, 235-245.

Shaner, G., and Finney, R. (1976). Weather and epidemics of *Septoria* leaf blotch of wheat. *Phytopathology* **66**, 781-785.

Shaw, M. W. (1990). Effects of temperature, leaf wetness and cultivar on the latent period on *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat. *Plant Pathology* **39**, 255-268.

Shaw, M. W. (1991a). Interacting effects of interrupted humid periods and light on infection of wheat leaves by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*). *Plant Pathology* **40**, 595-607.

Shaw, M. W. (1991b). Variation in the height to which tracer is moved by splash during natural summer rain in the UK. *Agricultural and Forest Meteorology* **55**, 1-14.

Shaw, M. W., and Royle, D. J. (1993). Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) on winter wheat in the U.K. *Plant Pathology* **42**, 882-899.

Shearer, B. L., and Zadoks, J. C. (1974). The latent period of *Septoria nodorum* in wheat. The effect of temperature and moisture under field conditions. *European Journal of Plant Pathology* **80**, 48-60.

Shipton, W. A., Boyd, W. R. J., Rosielle, A. A., and Sheareb, B. L. (1971). The common *Septoria* diseases of wheat. *Botanical Review* **37**, 231-262.

Sutton, J. C., Gillespie, T. J., and Hildebrand, P. D. (1984). Monitoring weather factors in relation to plant disease. *Plant Disease* **68**, 78-84.

Sutton, J. C., James, T. D. W., and Rowell, P. M. (1986). Botcast: A forecasting system to time the initial fungicide spray for managing botrytis leaf blight of onions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **18**, 123-143.

Taylor, C. F. (1956). A device for measuring the duration of dew deposits. *Plant Disease Reporter* **40**, 1025-1028.

Thomas, M. R., Cook, R. J., and King, J. E. (1989). Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its affect on yield. *Plant Pathology* **38**, 246-257.

Thompson, N. (1982). The duration of leaf wetness. *Meteorological Magazine* **110**, 1-12.

Tottman, D. R. (1987). The decimal code for the growth-stages of cereals, with illustrations. *Annals of Applied Biology* **110**, 441-454.

Tyldesley, J. B., and Thompson, N. (1980). Forecasting *Septoria nodorum* on winter wheat in Englend and Wales. *Plant Pathology* **29**, 9-20.

Van der Wal, A. F. (1978). Moisture as a factor in epidemiology and forecasting. In:Kozlowski, T.T. (Ed.), Water Deficits and Plant Growth, vol. 5: Water and Plant Disease. Academic Press, New York, pp 253–295.

Wallin, J. R. (1963). Dew, its significance and measurement in phytopathology. *Phytopathology* **53**, 1210-1216.

Weber, G. (1922). *Septoria* diseases of wheat. *Phytopathology* **12**, 537-585.

Wei, Y. Q., Bailey, B. J., and Stenning, B. C. (1995). A wetness sensor for detecting condensation on tomato plants. *J. Agric. Eng. Res.* **61**, 197-204.

Weiss, A. (1990). Leaf wetness: Measurements and models. *Remote Sensing Reviews* **5**, 215-224.

Weiss, A., and Hagen, A. F. (1983). Further experiments on the measurements of leaf wetness. *Agricultural Meteorology* **29** 207-212.

Weiss, A., and Lukens, D. L. (1981). Electronic circuit for detecting leaf wetness and comparison of two sensors. *Plant Disease* **65** 41-43.

Weiss, A., Lukens, D. L., and J.R., S. (1988). A sensor for the direct measurement of leaf wetness: Construction techniques and testing under controlled conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **43**, 241-249.

Wigneron, J. P., Calvet, J. C., and Kerr, Y. (1996). Monitoring water interception by crop fields from passive microwave observations. *Agricultural and Forest Meteorology* **80**, 177-194.

Wilks, D. S., and Shen, K. W. (1991). Threshold relative humidity duration forecasts for plant disease prediction. *J. Appl. Meteorol.* **30**, 463-477.

Zadoks, J. C., Chang, T. T., and Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* **14**, 415-421.

PARTIE II

Chapitre 2

Mesure de la durée d'humectation dans un couvert de blé d'hiver au moyen de capteurs

RÉSUMÉ

Les mesures de la durée d'humectation par des capteurs ont été comparées aux estimations visuelles à la surface des feuilles dans un couvert de blé d'hiver. L'évaluation de la performance des capteurs a été testée dans des parcelles d'essai sur le site d'Arlon (Belgique) durant la période de mai-juillet 2006 et avril-juillet 2007. Le suivi des périodes d'humectation nous a permis de calibrer trois capteurs d'humectation de type 237-Campbell. Le protocole expérimental adopté dans ce travail est simple : le début du dépôt de rosée et la fin de l'humectation sur les feuilles ont été observés visuellement à intervalles réguliers.

L'humectation est calculée chaque jour de 0 à 23 heures. Pour les trois capteurs, la différence entre l'estimation visuelle et la réponse des capteurs, est en moyenne pour les deux saisons culturales 2006 et 2007, inférieure à 1 heure.

Mots Clés : *Durée d'humectation, Méthode de mesure, Couvert de blé d'hiver.*

1. INTRODUCTION

La mesure de la variable durée d'humectation des feuilles est très utile pour l'application des modèles de prévision des attaques cryptogamiques (Burrage, 1972; Ciancio et Mukerji, 2007; Huber, 1992; Huber et Gillespie, 1992). Cette variable est notablement plus importante que la quantité totale d'eau stockée par les feuilles, en particulier pour le développement des maladies des plantes. Contrairement à la température de l'air, la durée d'humectation est une variable difficile à mesurer ou à estimer. Les difficultés liées à la détermination de la durée d'humectation sont dues essentiellement à l'absence de méthode standard pour sa détermination. En outre, les observations visuelles de l'humectation sont fastidieuses et

souffrent de la subjectivité de l'observateur ; elles constituent néanmoins la référence. Les capteurs d'humectation nécessitent une calibration pour chaque culture et pour chaque type d'humectation (Magarey et al., 2005). En effet, la mesure de la durée d'humectation dans différentes cultures et à différentes hauteurs à l'intérieur de plusieurs couverts végétaux, montre que cette variable est affectée non seulement par les conditions atmosphériques mais également par la structure de la plante, l'architecture et la taille, qui affectent le microclimat du couvert (Dalla Marta et al., 2008; Lulu et al., 2008; Sentelhas et al., 2005). En outre, l'humectation à la surface des feuilles est due à la fois à la pluie et à la rosée et elle peut se présenter sous forme de gouttes ou d'un film d'eau.

Outre l'observation, les capteurs d'humectation fournissent des données de référence pour la validation et l'application des modèles de simulation de la durée d'humectation (Huber et Gillespie, 1992; Magarey et al., 2005). Ils permettent également de fournir une mesure continue de la durée d'humectation. Pour la simulation et l'application de la durée d'humectation (ou la validation d'autres méthodes de la recherche en épidémiologie de la maladie de blé d'hiver), il est important d'avoir des mesures de référence afin de pouvoir comparer les résultats de mesurage aux données de simulation. Le but de ce chapitre est d'évaluer les performances de trois capteurs pour mesurer la durée d'humectation à l'échelle d'un couvert de blé d'hiver. Les données mesurées à l'aide de ces capteurs seront utilisées pour évaluer le modèle de la durée d'humectation SWEB. Cette étude s'avère utile pour l'application du modèle d'humectation et pour la détermination des conditions d'un environnement favorables à l'infection des feuilles de blé par *S. tritici*.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

On présentera dans cette partie, le site sélectionné pour nos expérimentations, les dispositifs expérimentaux, les techniques et méthodes employées, les mesures microclimatiques et les essais réalisés en laboratoire. Nous présentons également une partie du matériel et méthodes utilisés pour l'application du modèle d'humectation (Partie II-Chapitre 3).

2.1. Choix et caractéristiques des sites d'essai

Les caractéristiques et la situation géographique du site d'Arlon-Station sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau II-2-1. Caractéristiques du site d'essai d'Arlon.
Field site characteristics.

Station météo	Site	Région	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Année	Variété
Station agrométéorologique de Ulg	Arlon-Station	Arlon	49° 40' 55N	5° 49' 27E	406	2006	Flair Achat Urban Akteur
						2007	Flair Achat Akteur Hattrick Rosario

Le site d'Arlon-station se situe à une centaine de mètres du Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège (Ulg). Le site a été choisi pour les raisons suivantes :

- la proximité du bâtiment de recherche autorisant un suivi facile des événements dus à des périodes de pluie ou de rosée et de l'évolution de la maladie de la septoriose sur les feuilles dans des parcelles d'essai ;
- la disponibilité d'un parc météorologique près des parcelles d'essai qui fournit des données d'entrée du modèle de la durée d'humectation (Figure II-2-1).

Le dispositif expérimental installé durant la saison culturale 2006 sur ce site (Figure II-2-1) est destiné d'une part à enregistrer les variables d'entrée nécessaires à l'application du modèle SWEB ; et d'autre part, à des essais permettant de calibrer les capteurs d'humectation et à déterminer la quantité maximale d'eau retenue par une feuille dans un couvert de différentes variétés de blé d'hiver. Les essais sont conduits en quatre répétitions, chaque répétition contient quatre petites parcelles. Chaque parcelle est semée avec une variété de blé différente. La taille des parcelles est représentée à la figure II-2-1. Le choix des parcelles est effectué de façon à retenir un environnement parcellaire homogène qui permet de représenter la variabilité spatiale au sein du couvert.
Le même dispositif a été adopté pour la campagne de mesures 2007 mais en une seule répétition. La taille des parcelles a été augmentée en longueur (5 x 0.5 m). La variété Urban a été supprimée. Deux autres variétés ont été ajoutées, Hattrick et Rosario. Sept variétés, au total, ont été testées durant les deux années de mesures (Tableau II-2-1).

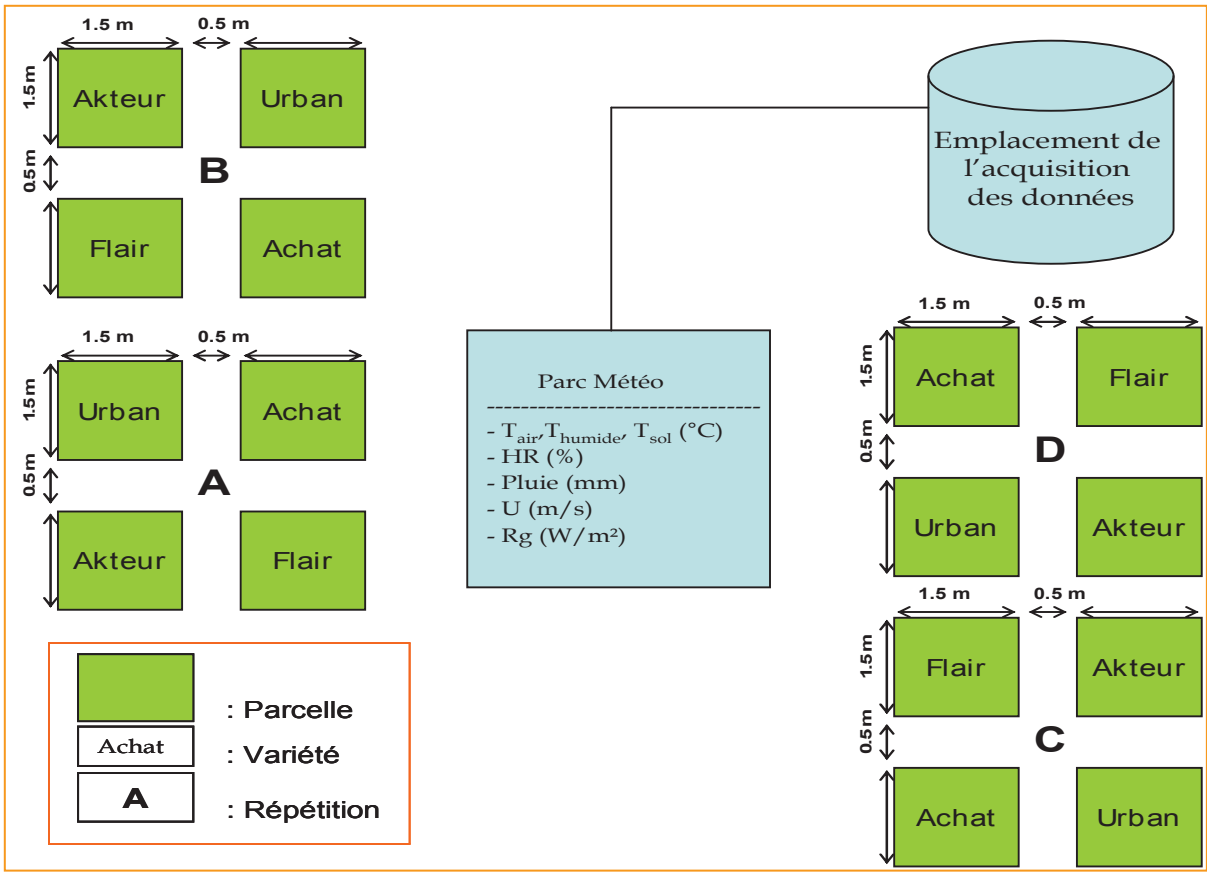


Figure II-2-1. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour le suivi de la durée d'humectation sur diverses variétés mises en essais sur le site d'Arlon durant la campagne de mesures 2006. Quatre variétés ont été semées en bloc. Chaque bloc est constitué d'un ensemble de quatre variétés. Le schéma illustre l'emplacement de la station météo.
Experimental design used for visual surface wetness monitoring on four winter wheat cultivars. Four replicate plot experiments were established at Arlon site during the period of March-July for one cropping seasons (2006).

2.2. Techniques et méthodologie de mesure

Notre méthodologie a été basée sur les références bibliographiques relatives à la modélisation de la durée d'humectation (Bhatia et Munkvold, 2002; Lau et al., 1999; Potratz et al., 1994).

L'étude épidémiologique et l'étude microclimatique ont été menées de front. Le but de l'étude épidémiologique était de suivre l'évolution de la septoriose sur les trois dernières feuilles et de comparer par la suite les périodes d'infection aux périodes d'humectation afin de définir une durée d'humectation nécessaire à l'infection des feuilles de blé par *S. tritici* (Partie II-Chapitre 4). Cette valeur nous permettra d'appliquer le modèle pour la détermination de la durée d'humectation pour la culture de blé d'hiver.

Un suivi sur les parcelles d'essai a été effectué à partir de la fin avril jusqu'à maturité finale (mi-juillet) :

- à une fréquence journalière pour la détermination du développement de la septoriose sur la surface foliaire des trois dernières feuilles (F1, F2, F3) ;
- la maladie a été quantifiée selon les échelles de JAMES (James, 1976) et le logiciel DISTRAIN développé par le Ministère de l'Agriculture Américain (Tomerlin et Howell, 1988). A chaque observation, nous avons enregistré le stade phénologique selon le code binaire de Zadoks (Zadoks et al., 1974) ;
- et après des événements de pluie et/ou de rosée pour la détermination des périodes d'humectation. Le début du dépôt de rosée et la fin de l'humectation sur les feuilles dans le couvert ont été observés visuellement et à l'aide d'une lampe torche. Les observations de la durée d'humectation ont été faites toutes les 15 minutes.

Le site expérimental abrite une station agrométéorologique (Figure II-2-1 et 3). Les données de température, d'humidité relative, de vitesse du vent, des précipitations et de la durée d'humectation sont mesurées à un intervalle de 2 minutes à l'aide d'un acquisiteur de données "Grant Dataloging 2020 1F8". Les données sont gérées à l'aide du logiciel "SquirrelView Assistant". Des données de la température sèche et humide sont aussi mesurées pour la détermination précise de l'humidité relative toutes les 15 minutes. Les données sont extraites à l'aide d'un câble de connexion (USB serial) afin d'être stockées dans une base de données. Les données collectées au niveau de ce site ont servi à la calibration des capteurs, à l'application du modèle SWEB et à la comparaison entre les quantités d'eau retenue par les différentes variétés au sein du couvert de blé.

On a également effectué d'autres mesures qui servent à l'ajustement du modèle à savoir : l'indice foliaire *(LAI)* sur les parcelles d'essai à l'aide d'un "SunScan Canopy Analysis System[1] (type SS1)". L'appareil estime indirectement la valeur de *LAI* à partir des mesures du *PAR* (Photosynthetically Active Radiation). Des mesures ont été réalisées en laboratoire pour déterminer la quantité maximale d'eau libre pouvant être interceptée par une feuille de blé.

[1] The SunScan system offers convenient and flexible tools for measuring and analysing incident and transmitted Photosynthetically Active Radiation *(PAR)* in crop canopies. SunScan uses field measurements of *PAR* in crop canopies to provide valuable information about *LAI* and biomass production.

2.2.1. Les capteurs de mesure de la durée d'humectation

Dans ce chapitre on se basera sur l'étude bibliographique relative à la détermination de la position, de l'orientation et de l'inclinaison appropriées des capteurs afin de mieux représenter la variabilité de la durée d'humectation dans le couvert.

Pendant la période d'expérimentation nous avons installé trois capteurs d'humectation au dessus et dans la végétation à différentes hauteurs (Figure II-2-3). L'humectation est calculée pour chaque jour de 0 à 23 heures.

2.2.1.1. Description

Des capteurs de la durée d'humectation modèle 237 (Campbell® Scientific. Inc.) (Figure II-2-2) ont été utilisés pour mesurer la durée d'humectation durant toute la période de l'expérimentation. Le capteur de mouillure de feuille 237 est constitué d'un circuit sur plaque rigide en époxy (75 x 60 mm) avec des doigts en cuivre plaqué Or qui s'entrelacent (Figure II-2-2). La condensation sur le capteur diminue la résistance entre les doigts, et cette variation est mesurée par la centrale d'acquisition. La résistance varie entre 3000 kΩ (sec) et 1 kΩ (humide). Les gouttelettes suffisamment petites pour ne pas toucher deux doigts ne diminuent pas la résistance du circuit. C'est pourquoi une double couche de peinture au Latex, qui étale les gouttelettes, doit être appliquée sur chaque capteur (Gillespie et Kidd, 1978; Potratz et al., 1994). La peinture doit faciliter le repérage du début de la condensation. Elle améliore non seulement la précision des capteurs mais également leur sensibilité, parce qu'elle augmente la capacité du capteur à détecter et à mesurer l'humectation favorisée par de petites gouttelettes d'eau (Sentelhas et al., 2004b).

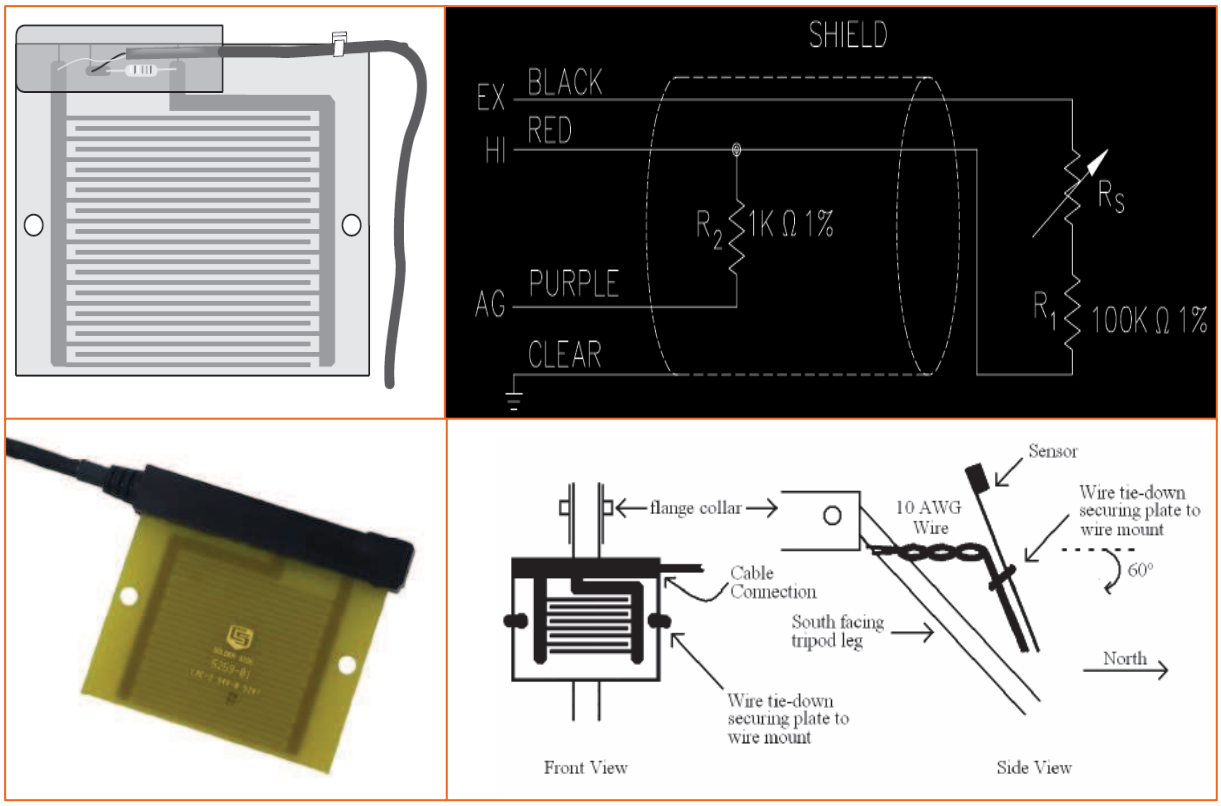


Figure II-2-2. Schéma du capteur de durée d'humectation de type 237 (Campbell Scientific, Inc.).
Leaf wetness sensor 237 Campbell Scientific Model: sensor schematic and mounting.

2.2.1.2. Peinture des capteurs

En 2006, on a mesuré la durée d'humectation avec trois capteurs sans peinture (Tableau II-2-2). Durant la saison culturale 2007, ces trois capteurs d'humectation ont été utilisés pour tester l'effet de l'application de la peinture. Les capteurs ont été peints avec trois couches de peinture blanche au Latex (selon le protocole décrit en annexe G), pour augmenter la capacité à détecter les gouttes de petit diamètre (généralement inférieur à 1 mm). Les capteurs sont soumis ensuite à un traitement thermique (60–70°C pendant 12 h) pour enlever et désactiver les composants hygroscopiques (Paulo C., Sentelhas communication personnelle).

2.2.1.3. Installation des capteurs (Figure II-2-3)

Les capteurs ont été installés au niveau de la dernière feuille de blé formée et ajustés en fonction de la hauteur du couvert et inclinés de 30° par rapport à l'horizontal. Ils ont été également installés à différentes positions du couvert (à l'intérieur et à l'extérieur) pour tester la variabilité de la mesure dans le couvert. Les capteurs ont toujours été orientés vers le Nord (Gillespie et Kidd, 1978; Potratz et al., 1994; Sentelhas et al., 2004a). Chaque capteur a été monté sur une section de tuyauterie en PVC (Figure II-2-3).

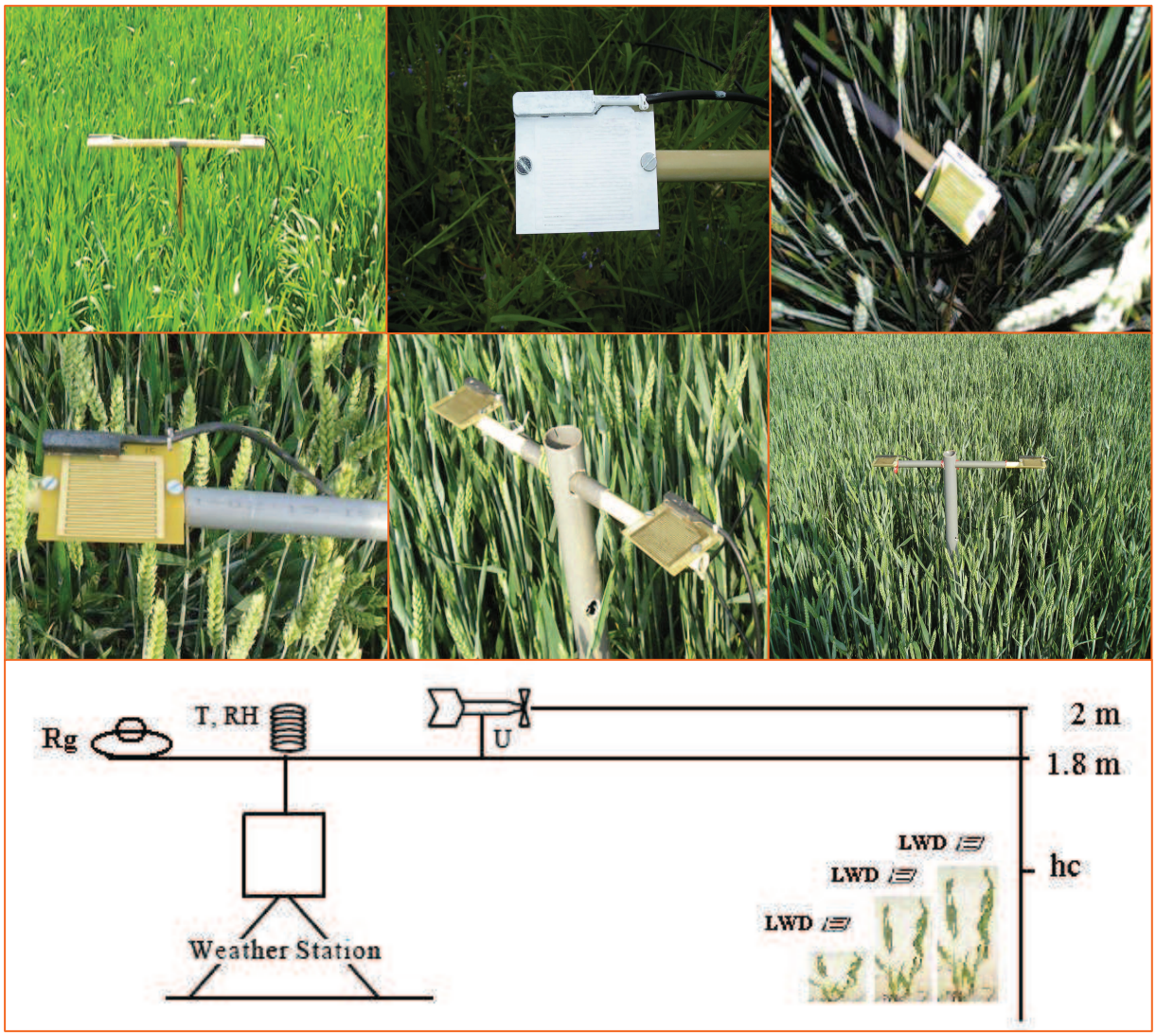


Figure II-2-3. Méthodologie de la détermination de la durée d'humectation. Schéma de l'installation des capteurs d'humectation, de température, d'humidité relative, du rayonnement. Tous les capteurs sont reliés à un acquisiteur de données (Grant-Logger Type 1F8).

2.2.1.4. Maintenance des capteurs

Une pellicule d'oxydation peut se former à la surface du capteur et empêcher tout contact. Dans ce cas, les capteurs sont nettoyés avec un peu d'alcool. Un nettoyage avec un chiffon doux imprégné d'eau pour les capteurs peints et d'isopropanol pour les capteurs non peints a été effectué à chaque passage sur site même si aucun problème n'a été signalé. Les capteurs ont été également entretenus et inspectés pour éliminer les contaminants. Ceux-ci peuvent surestimer la durée d'humectation (Weiss et Hagen, 1983).

2.2.2. Choix des variétés

La calibration des capteurs a été faite sur la variété Achat en 2006 et sur la variété Akteur en 2007. Les caractéristiques des variétés utilisées dans cette étude sont présentées dans les annexes (Annexe L).

2.2.3. Mesures microclimatiques

Les variables météorologiques enregistrées sur ce site sont (Figure II-2-3) :

2.2.3.1. Rayonnement

Les mesures sont effectuées avec un appareil de mesure de rayonnement (C11-Kipp & Zonnen) et à un niveau de référence de 2 m.

2.2.3.2. Vitesse du vent

Celle-ci est mesurée au niveau de référence 2 m au dessus du sol. Il s'agit d'un anémomètre à hélice et girouette combinés (LGR).

2.2.3.3. Température sèche et humide

Les températures sèches et températures humides de l'air sont mesurées à 2 m au dessus du sol, sous abri en bois doublement ventilé, à l'aide de capteurs de température de type CTN.

2.2.3.4. Humidité relative

L'humidité relative est également mesurée à une hauteur de 2 m au dessus du sol à l'aide d'un capteur MP100A combinant la température et l'humidité relative (Campbell® Scientific. Inc.).

2.2.4. Méthodologie de détermination de la quantité maximale d'eau retenue par une feuille dans un couvert de blé d'hiver (paramètre C_1 du modèle SWEB).

Afin de déterminer la quantité d'eau déposée à la surface des feuilles (Figure II-2-4a) de chaque variété testée (Tableau II-2-1), nous avons effectué un échantillonnage représentatif du couvert de chaque variété après chaque événement de pluie et après le lever du soleil pour le dépôt de la rosée. Le nombre d'échantillons récoltés pendant chaque période d'observation est de trois feuilles par plante (10 plantes par objet). Cette méthode utilisée par Miranda et al. (2000) consiste à déterminer la quantité d'eau (rosée, pluie et humectation artificielle) libre interceptée par les feuilles de chaque variété. Les échantillons de feuilles récoltés ont été immédiatement mis dans des sacs en plastique hermétiquement fermés. Elles sont ensuite pesées à l'aide d'une balance de précision (0.1 mg) au laboratoire du Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège (Figure II-2-4b). La quantité d'eau a été ensuite rapportée à la surface foliaire de chaque feuille. La mesure de la surface a

été déterminée par l'analyse des images prises à l'aide d'un appareil photo-numérique Canon 7 Méga-pixels sur un support de fond bleu (Figure II-2-4c). Le logiciel *Assess* (*Image Analysis Software for Plant Disease Quantification*) a été utilisé pour l'analyse des images et l'obtention des surfaces foliaires (Figure II-2-4d). Ce logiciel a été conçu et mis en application pour aider des pathologistes à évaluer quantitativement les maladies des plantes, tout en fournissant une simple interface utilisateur. Le logiciel est optimisé pour la mesure de la surface foliaire, le pourcentage de la surface infectée et le nombre de lésions.

La quantité maximale d'eau retenue par les feuilles du couvert végétal a été testée en fonction de différentes variétés et selon trois types de source d'humectation (rosée, pluie et humectation artificielle). L'humectation artificielle a été faite à l'aide d'un pulvérisateur-bouteille.

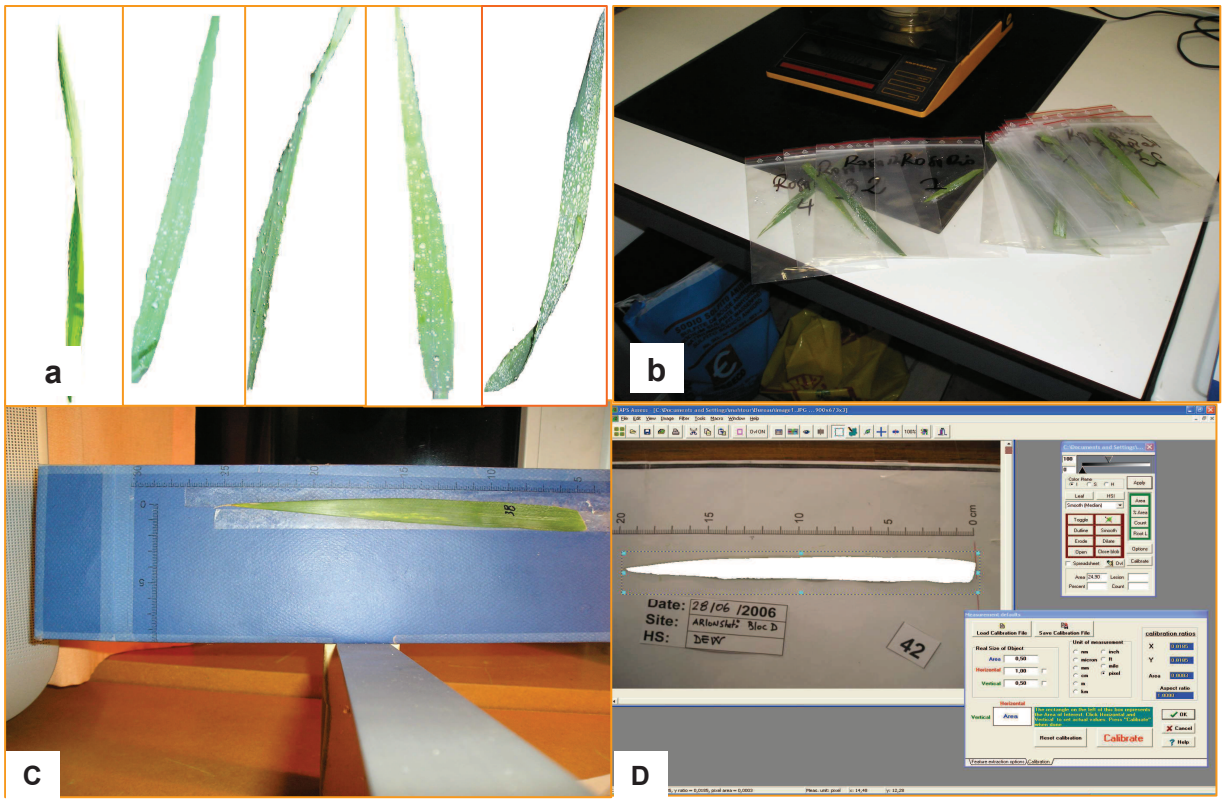


Figure II-2-4. Méthodologie de détermination de la quantité maximale de l'eau libre retenue par la surface foliaire de la culture de blé d'hiver. (a) Exemple de calcul de la surface de la feuille à l'aide de logiciel Assess. (b) Les échantillons de feuilles récoltés. (c) un support de fond bleu pour la prise des images à l'aide d'un appareil photo-numérique (d) Détermination de la surface foliaire à l'aide du logiciel *Assess.*
A methodology for determining the maximum water storage for an average leaf in winter wheat canopy (C_1).

3. RÉSULTATS

3.1. Méthode de calibration des capteurs par des données d'observation visuelle d'humectation

Actuellement, la méthode la plus reconnue pour calibrer les capteurs d'humectation est de comparer les données d'observation visuelle du couvert avec celles mesurées par les capteurs. Pour chaque capteur on a mesuré la résistance au point de transition (Dry/Wet threshold) entre l'état sec et l'état humide (Jones, 1986; Magarey et al., 2005). Les différents points de transition rapportés dans la littérature pour le modèle 237 Campbell sont présentés dans l'annexe (Annexe M).

Pour obtenir de meilleurs résultats, tous les capteurs ont été calibrés à différentes hauteurs dans le couvert du blé sur le site d'essai, étant donné que le point de transition varie selon les endroits dans la végétation (Sentelhas et al., 2004a). Les capteurs ont été placés dans le couvert et on observe ensuite la végétation jusqu'à ce qu'elle soit dans l'état que l'on considèrera comme humide. Quand cet état est atteint, on note la mesure de la résistance enregistrée par la centrale de mesures. Un changement rapide de la résistance se passe autour du point de transition. Cette résistance sera le point de transition à utiliser durant toute la période d'expérimentation. La résistance au point de transition (Dry/Wet threshold) entre l'état sec et humide, déterminée pour les trois capteurs sans peinture utilisés dans cette étude a été fixée à 220 kΩ. Pour toutes valeurs supérieures ou égales à ce seuil, le capteur est considéré comme sec (0). Pour toutes valeurs inférieures ou égales à 220 kΩ, le capteur est considéré comme mouillé (1). Pour les capteurs auxquels on a appliqué trois couches de peinture, le seuil de transition est beaucoup plus élevé. Une valeur au voisinage de 6800 kΩ a été utilisée dans cette étude.

La méthodologie d'analyse quantitative utilisée pour la comparaison mesure-observation est basée sur la détermination de l'erreur moyenne, ME, (qui décrit le sens de l'erreur en termes de sous-estimation ou sur-estimation du temps ou de la durée d'humectation) et l'erreur moyenne absolue, MAE, (qui indique la grandeur de l'erreur moyenne) pour chaque événement de rosée ou de pluie. L'erreur moyenne (ME) a été calculée par la moyenne de la différence entre les valeurs mesurées et observées (équation 1). De même pour l'erreur moyenne absolue (MAE) sauf que la différence est exprimée en valeur absolue (équation 2).

$$ME = \frac{\sum_0^n (v_o - v_m)}{n} \qquad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_0^n (|v_o - v_m|)}{n} \quad (2)$$

avec : n = le nombre de données (observé – mesuré) ; v_o = les valeurs observées et v_m = les valeurs mesurées. De plus, pour la comparaison de la durée totale d'humectation nous avons calculé également le coefficient de détermination R^2 par l'analyse de régression.

Pour l'étude de l'importance de la variabilité de la durée d'humectation, les données mesurées à l'aide des trois capteurs utilisés ont été évaluées durant deux saisons culturales par le coefficient de variation (CV)[(2)]. La figure suivante montre la distribution de l'écart-type (SD) en fonction de la moyenne $\overline{X}$ des durées d'humectation (exprimées en heures) mesurées en 2006 et 2007.

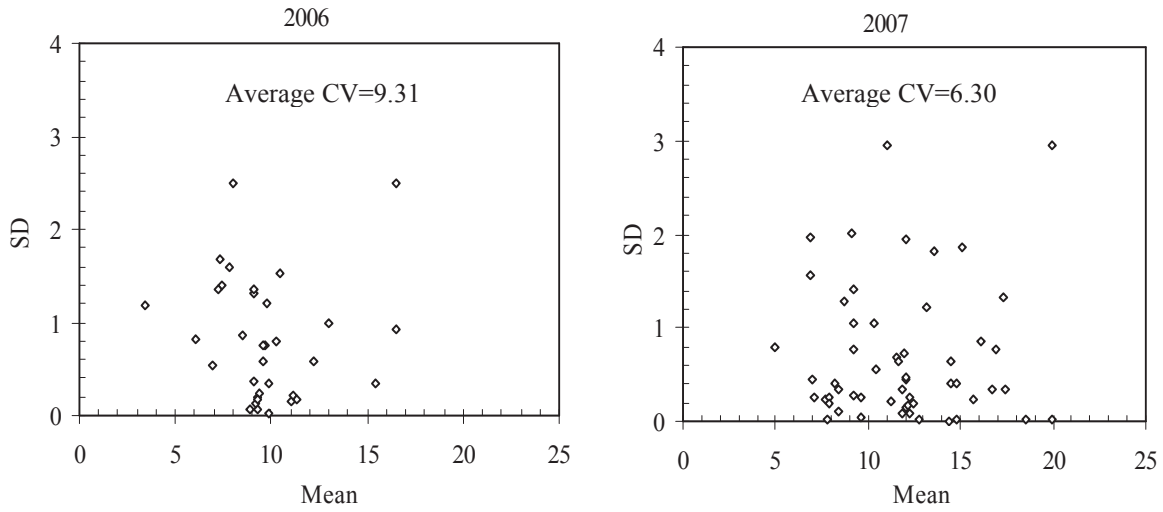


Figure II-2-5. Variation de l'écart-type (SD) en fonction de la moyenne (Mean) des durées d'humectation (h) mesurées par trois capteurs en 2006 et 2007.
Variability among the three flat plate sensors used for SWD measurement: relationships between SWD mean values (mean for the three sensors) and the standard deviation (SD).

Les valeurs moyennes des coefficients de variation (CV%) pour la saison 2006 et 2007 sont respectivement de 9.31% (approximativement 53 min pour une valeur moyenne de 9.54 h sur 32 événements) et 6.30% (approximativement 43 min pour une valeur moyenne de 11.63 h sur 52 événements).

[2] $CV\% = (SD / \overline{X}) * 100$, where SD is SWD standard deviation and $\overline{X}$ is the SWD mean value.

3.2. Analyse des résultats de la comparaison entre la mesure par trois capteurs et l'estimation visuelle de la durée d'humectation

La calibration des capteurs a été effectuée sur un certain nombre d'événements d'humectation dus à la pluie et à la rosée qui sont survenus durant les saisons culturales 2006 et 2007 (Tableau II-2-2). L'évaluation des performances des capteurs a été réalisée par comparaison entre les données de mesure par les capteurs et les données d'observation du début (wetness onset), de la fin d'humectation (wetness dry-off) ainsi que pour la durée totale d'humectation (wetness duration).

Tableau II-2-2. Nombre d'événements de début d'humectation (wetness onset), de fin d'humectation (wetness dry-off) et de durée totale d'humectation (wetness duration) observés (Obs.) et mesurés à l'aide de trois capteurs d'humectation (Sen-1, Sen-2 et Sen-3) et qui sont survenus durant les saisons culturales 2006 et 2007.
Number of events of wetness onset, wetness dry-off and wetness duration, visually observed (Obs.) or measured with electronic flat plate sensors (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) in 2006 and 2007 in the Agrometeorological station of Arlon.

Site location	Year	Events	Sensors (No. Deployed)	Cultivar	Wetness onset				Wetness dry off				Wetness duration			
					Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3	Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3	Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3
Arlon	2006	Rain	Unpainted(3)	Achat	-	-	-	-	11	9	11	9	-	-	-	-
		Dew			15	12	15	11	16	16	15	16	10	8	9	8
		All			15	12	15	11	27	25	26	25	10	8	9	8
	2007	Rain	Painted(3)	Akteur	-	-	-	-	17	17	12	17	-	-	-	-
		Dew			10	9	8	9	9	9	9	9	6	5	6	4
		All			-	-	-	-	26	26	21	26	6	5	6	4

Les comparaisons entre le début de l'humectation (dew onset), la fin de l'humectation (dry-off) et la durée totale d'humectation sont représentées respectivement dans les tableaux II-2-3, II-2-4 et II-2-5 (Tableau II-2-3, II-2-4 et II-2-5). Les observations du début et de la fin d'humectation ont été faites dans un couvert de blé d'hiver à un intervalle de temps de 15 minutes après le coucher et le lever du soleil. Pour les événements durant lesquels l'humectation est due à la pluie, les observations ont été suivies jusqu'à l'assèchement total du couvert.

Tableau II-2-3. Comparaison entre les données d'observations et de mesures du début d'humectation (wetness onset) due à la rosée. Le début d'humectation a été mesuré par trois capteurs (Sen-1, Sen-2 et Sen-3) dans un couvert de blé d'hiver en 2006 (mai-juillet) et 2007 (avril-juillet) à la station agrométéorologique d'Arlon.
Comparison of observed and measured wetness onset caused by dew. The wetness was measured by three flat plate sensors (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) over winter wheat canopy at the agrometeorological station of Arlon, during May-July in 2006 and April-July 2007.

Year	Date	Wetness source	Dew onset						
			Time[(1)]				Difference (min)		
			Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3	Sen-1	Sen-2	Sen-3
2006	11-12 May	Dew	22:15	22:03	23:17	-	12	-62	-
	28-29 May	Dew	0:00	23:59	23:59	0:00	1	1	0
	2-3 June	Dew	23:30	-	22:15	22:48	-	105	42
	3-4 June	Dew	23:15	23:30	23:33	23:31	-15	-18	-16
	4-5 June	Dew	0:15	23:47	23:56	-	28	19	-
	5-6 June	Dew	1:00	0:29	0:23	1:53	31	37	-53
	6-7 June	Dew	0:30	0:25	23:30	-	5	60	-
	12-13 June	Dew	22:30	-	22:10	22:18	-	25	12
	13-14 June	Dew	0:15	-	21:58	-	-	137	-
	16-17 June	Dew	23:00	22:25	21:59	22:22	35	61	38
	17-18 June	Dew	23:00	22:08	22:30	23:00	52	30	0
	22-23 June	Dew	23:15	23:18	23:11	23:16	-3	4	-1
	27-28 June	Dew	22:25	23:13	23:03	22:15	-48	-38	10
	30 June-1 July	Dew	22:30	22:43	22:46	21:53	-13	-16	37
	2-3 July	Dew	1:00	1:27	1:27	1:42	-27	-27	-42
	ME						4.8	21.2	2.5
	MAE						22.5	42.7	22.8
2007	20-21 April	Dew	0:00	-	0:52	0:53	-	-52	-53
	21-22 April	Dew	22:45	23:13	23:40	22:42	-28	-55	3
	22-23 April	Dew	21:45	21:30	22:00	22:00	15	-15	-15
	25-26 April	Dew	22:00	22:05	22:46	22:06	-5	-46	-6
	26-27 April	Dew	21:45	21:15	-	21:10	30	-	35
	27-28 April	Dew	21:30	21:00	-	21:35	30	-	-5
	2-3 May	Dew	23:45	22:47	21:53	23:30	58	112	15
	3-4 June	Dew	22:15	21:28	21:28	-	47	47	-
	13-14 June	Dew	23:00	0:38	0:42	0:46	-98	-102	-104
	14-15 June	Dew	22:30	23:35	23:35	23:44	-65	-65	-74
	ME						-1.8	-22.0	-22.7
	MAE						41.8	61.8	34.4

(1) Time when dew onset was observed visually or detected by sensors.
A positive value indicates earlier detection of wetness onset by the sensor as compared with the observation.
A negative value indicates delayed detection of wetness onset by the sensor as compared with the observation.
- , No data or missing data.
ME: mean error; MEA: mean absolute error.

Tableau II-2-4. Comparaison entre les données d'observations et de mesures de la fin d'humectation (wetness dry-off). La fin d'humectation a été mesurée par trois capteurs (Sen-1, Sen-2 et Sen-3) dans un couvert de blé d'hiver en 2006 (mai-juillet) et 2007 (avril-juillet) à la station agrométéorologique d'Arlon.
Comparison of observed and measured wetness dry-off caused by rain and/or dew. The wetness was measured by three flat plate sensors (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) over winter wheat canopy at the agrometeorological station of Arlon, during May-July in 2006 and April-July 2007.

Year	Date	Wetness	Wetness dry off						
			Time[1]				Difference (min)		
		source	Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3	Sen-1	Sen-2	Sen-3
2006	6/05/2006	Rain	10:00	-	7:48	7:49	-	132	131
	11/05/2006	Rain	11:00	9:50	9:24	-	70	96	-
	12/05/2006	Rain	9:30	8:06	7:28	-	84	122	-
	24/05/2006	Dew	10:25	10:04	9:53	10:00	21	32	25
	29/05/2006	Rain	8:30	9:04	9:26	9:22	-34	-56	-52
	30/05/2006	Rain	11:00	9:57	9:46	10:02	63	74	58
	1/06/2006	Rain	11:00	-	10:48	12:17	-	12	-77
	2/06/2006	Rain	10:30	10:10	10:09	10:43	20	21	-13
	3/06/2006	Dew	9:40	9:18	9:21	9:42	22	19	-2
	5/06/2006	Dew	9:00	9:06	9:10	9:41	-6	-10	-41
	6/06/2006	Dew	9:40	8:27	8:46	7:40	73	54	120
	7/06/2006	Dew	8:15	6:31	7:58	8:05	104	17	10
	8/06/2006	Dew	7:00	5:53	7:25	7:35	67	-25	-35
	9/06/2006	Dew	8:30	7:44	8:11	8:03	46	19	27
	10/06/2006	Dew	8:20	7:49	8:09	7:59	31	11	21
	11/06/2006	Dew	7:52	8:15	8:12	8:10	-23	-20	-18
	13/06/2006	Dew	6:00	6:12	7:28	7:25	-12	-88	-85
	16/06/2006	Rain	12:15	11:00	8:34	8:17	75	221	238
	17/06/2006	Dew	8:30	8:18	8:14	7:57	12	16	33
	18/06/2006	Dew	8:15	8:15	8:10	7:59	0	5	16
	23/06/2006	Dew	8:30	8:10	8:09	8:06	20	21	24
	24/06/2006	Dew	7:00	7:50	7:48	7:44	-50	-48	-44
	28/06/2006	Dew	8:30	8:21	-	7:38	9	-	52
	29/06/2006	Rain	13:00	10:47	10:26	12:07	133	154	53
	30/06/2006	Rain	9:15	9:15	8:25	8:28	0	50	47
	1/07/2006	Dew	8:30	8:05	7:57	7:50	25	33	40
	7/07/2006	Rain	10:30	8:47	10:12	8:17	103	18	133
	ME[2]						34,1	33,8	26,4
	MAE[2]						44,1	52,8	55,8
	ME[3]						21,2	2,4	8,9
	MAE[3]						32,6	27,9	37,1
	ME[4]						57,1	76,7	57,6
	MAE[4]						64,7	86,9	89,1
2007	21/04/2007	Dew	8:15	7:42	7:42	8:10	33	33	5
	22/04/2007	Dew	10:15	9:02	8:56	9:19	73	79	56
	23/04/2007	Dew	10:30	8:57	9:02	9:19	93	88	71
	25/04/2007	Dew	10:00	8:25	8:21	8:38	95	99	82
	26/04/2007	Dew	8:45	8:46	8:36	8:58	-1	9	-13
	3/05/2007	Dew	8:00	8:00	7:55	7:54	0	5	6
	14/05/2007	Rain	10:00	8:26	9:10	9:10	94	50	50
	15/05/2007	Rain	12:15	10:04	11:02	11:41	131	73	34
	21/05/2007	Rain	12:00	10:19	-	9:24	101	-	156
	22/05/2007	Rain	9:15	9:14	-	9:33	1	-	-18
	23/05/2007	Rain	8:30	9:32	-	9:33	-62	-	-63
	24/05/2007	Rain	10:00	9:21	-	9:21	39	-	39
	25/05/2007	Rain	9:00	9:30	-	9:35	-30	-	-35
	31/05/2007	Rain	13:15	12:37	13:24	13:17	38	-9	-2
	4/06/2007	Dew	9:45	9:52	9:12	10:11	-7	33	-26
	7/06/2007	Dew	7:00	6:24	6:29	6:21	36	31	39
	11/06/2007	Rain	9:00	9:36	9:26	9:15	-36	-26	-15
	13/06/2007	Dew	9:30	9:47	9:54	9:40	-17	-24	-10
	15/06/2007	Rain	8:30	7:52	7:58	8:17	38	32	13
	19/06/2007	Rain	10:00	8:41	10:43	8:45	79	-43	75
	20/06/2007	Rain	11:30	10:08	10:05	10:35	82	85	55
	21/06/2007	Rain	11:15	11:23	11:23	11:33	-8	-8	-18
	22/06/2007	Rain	11:45	11:22	10:30	10:12	23	75	93
	25/06/2007	Rain	14:30	13:48	13:33	14:13	42	57	17
	28/06/2007	Rain	8:00	9:45	9:42	9:43	-105	-102	-103
	2/07/2007	Rain	14:00	12:33	12:34	13:08	87	86	52
	ME[2]						31,5	29,7	20,8
	MAE[2]						52,0	49,9	45,2
	ME[3]						33,9	39,2	23,3
	MAE[3]						39,4	44,6	34,2
	ME[4]						30,2	22,5	19,4
	MAE[4]						58,6	53,8	51,4

(1) Time when wetness ending was observed visually or detected by sensors.
(2) Wetness was caused by dew and rain; (3) wetness was caused by dew; (4) wetness was caused by rain.
A positive value indicates earlier detection of wetness onset by the sensor as compared with the observation.
A negative value indicates delayed detection of wetness onset by the sensor as compared with the observation.
- , No data or missing data. ME: mean error; MEA: mean absolute error.

Tableau II-2-5. Comparaison entre les données d'observations et de mesures de la durée d'humectation. La durée d'humectation a été mesurée par trois capteurs (Sen-1, Sen-2 et Sen-3) dans un couvert de blé d'hiver en 2006 (mai-juillet) et 2007 (avril-juillet) à la station agrométéorologique d'Arlon.
Comparison of observed and measured wetness duration caused by dew. The wetness was measured by three the flat plate sensors (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) at over winter wheat canopy, at agrometeorological station of Arlon, during May-July in 2006 and April-July 2007.

Observation				Wetness	Canopy Surface Wetness Duration (h)			
					Visual	Measured		
Day start	Day end	Hour start	Hour end	source	observation	Sen-1	Sen-2	Sen-3
2/06/2006	3/06/2006	23:30	9:40	Dew	10.17	-	11.10	10.90
4/06/2006	5/06/2006	0:15	9:00	Dew	8.75	9.32	9.23	-
5/06/2006	6/06/2006	1:00	9:40	Dew	8.67	7.97	8.38	5.78
6/06/2006	7/06/2006	0:30	8:15	Dew	7.75	6.10	8.47	-
12/06/2006	13/06/2006	22:30	6:00	Dew	7.50	-	9.30	9.12
16/06/2006	17/06/2006	23:00	8:30	Dew	9.50	9.88	10.25	9.58
17/06/2006	18/06/2006	23:00	8:15	Dew	9.25	10.12	9.67	8.98
22/06/2006	23/06/2006	23:15	8:30	Dew	9.25	8.87	8.97	8.83
27/06/2006	28/06/2006	22:25	8:30	Dew	10.08	9.13	-	9.37
30/06/2006	1/07/2006	22:30	8:30	Dew	10.00	9.37	9.18	9.95
Mean					9.09	8.85	9.39	9.06
ME						0.31	-0.41	0.24
MAE						0.77	0.72	0.85
R^2						0.93	0.94	0.87
20/04/2007	21/04/2007	0:00	8:15	Dew	8.3	-	6.83	7.28
21/04/2007	22/04/2007	22:45	10:15	Dew	11.5	9.82	9.27	-
22/04/2007	23/04/2007	21:45	10:30	Dew	12.3	11.45	11.03	11.32
25/04/2007	26/04/2007	22:00	8:45	Dew	10.8	10.68	9.83	10.87
2/05/2007	3/05/2007	23:45	8:00	Dew	8.3	9.22	10.03	8.48
3/06/2007	4/06/2007	22:15	9:45	Dew	11.5	11.98	11.73	-
Mean					10.45	10.63	9.79	9.49
ME						0.25	0.66	0.44
MAE						0.81	1.32	0.56
R^2						0.96	0.90	0.98

A positive (a negative) values indicated that surface wetness duration simulated is larger (smaller) than observed/measured response.
- , No data or missing data.
ME: mean error; MEA: mean absolute error.
R^2: was calculated from a linear regression.

La différence maximale entre les valeurs mesurées et observées pour le début de l'humectation est de 137 minutes en 2006 et 112 minutes en 2007 (Tableau II-2-3) et pour l'assèchement du couvert, elle est de 238 minutes et 156 minutes en 2007 et en 2006 respectivement (Tableau II-2-4). Une différence maximale de la durée totale d'humectation de 2.89 heures en 2006 et 2.23 en 2007 a aussi pu être observée (Tableau II-2-5).

L'analyse des résultats montre également que les valeurs de MAE pour le début de la rosée pour les capteurs 1, 2 et 3 sont respectivement de 22.5, 42.7 et 22.8 minutes en 2006 et 41.8, 61.8 et 34.4 minutes en 2007. Pour l'assèchement du couvert les valeurs de MAE pour les capteurs 1, 2 et 3 sont de 44.1, 52.8 et 55.8 minutes en 2006 et de 52.0, 49.9 et 45.2 minutes en 2007. L'erreur moyenne de la durée d'humectation pour les trois capteurs est respectivement de 0.77, 0.72 et 0.85 heures en 2006 et de 0.81, 1.32 et 0.56 heures en 2007. En général, les capteurs ont sous-estimé la durée d'humectation pour les deux saisons

culturales sauf pour le capteur 2 en 2006 (la valeur de ME est négative). Les capteurs détectent parfois des périodes d'humectation avant ou après que l'humectation soit observée sur les feuilles. La différence entre les valeurs observées et mesurées peut s'expliquer aussi par le fait que le bilan énergétique au niveau de la feuille est différent de celui d'un capteur (Magarey et al., 2005). En outre, les capteurs donnent une valeur de mesure indirecte et continue alors que les observations se font toutes les 15 minutes. Il est possible aussi que les composantes hygroscopiques présentes dans la peinture puissent conduire à une détection plus précoce dans des conditions très sèches (Lau et al., 1999; Magarey et al., 2006).

Dans la plupart des cas étudiés, l'assèchement des capteurs est beaucoup plus rapide que celui des feuilles dans le couvert. L'assèchement du couvert végétal se fait plus facilement à la surface d'un capteur qu'à la surface des feuilles. Par conséquent, une sous-estimation de la durée d'humectation est engendrée. En effet, la surface d'un capteur reçoit plus de rayonnement que les feuilles du couvert après le lever du soleil (Pedro et Gillespie, 1982). L'altération de la surface des capteurs peut aussi réduire leur performance (Magarey et al., 2006).
Enfin, en analysant encore les résultats obtenus, nous ne constatons pas de différence entre les capteurs avec ou sans peinture. Bien que l'application de trois couches de peinture s'est avérée efficace dans d'autres études (Lau et al., 1999; Potratz et al., 1994; Sentelhas et al., 2004a; Sentelhas et al., 2004b) elle n'a pas été confirmée dans notre étude.

3.3. Détermination de la quantité d'eau libre retenue par les feuilles de quatre variétés différentes sur des petites parcelles homogènes.

La variabilité microclimatique au sein du couvert est influencée par plusieurs facteurs : la surface foliaire, la structure de la plante, la densité du semis, etc. Le but de cette expérimentation était de comparer les petites parcelles expérimentales des différentes variétés (Figure II-2-2) et de vérifier si les quantités d'eau retenues par les feuilles du couvert diffèrent selon les variétés testées et de déterminer ainsi la quantité maximale de l'eau retenue par une feuille. Cette valeur sera utilisée pour l'ajustement du modèle de la durée d'humectation. Cette hypothèse est testée en comparant les moyennes des quantités d'eau de pluie et de rosée, retenues par ces variétés par une étude de l'analyse de variance. Les facteurs de variation étudiés sont : la variété, l'étage foliaire (Tableau II-2-6) de chaque variété et la source d'humectation (Tableau II-2-7). Le choix des variétés est motivé par l'existence d'une

différence de la forme, de l'architecture et de la surface foliaire et par conséquent la densité du couvert. Les mesures ont été effectuées à différents stades phénologiques.

Le tableau II-2-6 présente la moyenne arithmétique et les valeurs minimales et maximales calculées pour l'ensemble des échantillons de chaque variété (toute source d'humectation confondues). La quantité d'eau libre retenue par chaque feuille est exprimée en cm³ d'eau/cm² de feuille. L'analyse de ces données donne la quantité d'eau, en moyenne, retenue par la surface du trois feuilles (F1, F2, F3) est de 0,0127 pour la variété Akteur, 0,0130 pour la variété Achat, 0,0163 pour la variété Flair et 0,0096 pour la variété Urban (seulement sur F1 et F2). L'analyse des résultats montre également que la différence entre ces variétés est significative au seuil de signification 0,05 ($p<0,05$). Une valeur maximale de la quantité d'eau retenue par la feuille de blé de 0,058 cm³/cm² a été observée pour la variété Flair sur F1.

Tableau II-2-6. Résultats de la détermination de la quantité maximale *(C_1)* d'eau libre (en cm³ d'eau/cm² de feuille) retenue par les feuilles de quatre variétés différentes de blé d'hiver : toute source d'humectation confondue.
Determination of the maximum water storage for an average leaf in winter wheat canopy (C_1): for rain, dew and spray.

Groupes de variétés	Feuille	Nombre d'échantillons	Moyenne	MIN	MAX
Akteur	F1	57	0,0087	0,0032	0,0320
Achat		57	0,0170	0,0034	0,0482
Flair		57	0,0191	0,0036	0,0580
Urban		57	0,0100	0,0039	0,0192
Akteur	F2	57	0,0099	0,0040	0,0311
Achat		57	0,0108	0,0042	0,0243
Flair		57	0,0127	0,0040	0,0480
Urban		57	0,0092	0,0047	0,0125
Akteur	F3	57	0,0156	0,0091	0,0298
Achat		57	0,0113	0,0051	0,0173
Flair		57	0,0171	0,0075	0,0412

L'analyse individuelle de chaque feuille d'une même variété (feuilles F1, F2, F3) montre aussi une différence significative (Tableau II-2-6) malgré une faible différence entre les moyennes ($P<0,05$).

Pour la détermination de la quantité d'eau libre retenue par la surface foliaire en fonction de différentes sources d'humectation (Rosée, pluie et humectation artificielle), 168 feuilles (F1, F2 et F3) de différentes variétés ont été choisies et analysées. Le tableau II-2-7 montre les résultats de l'analyse de variance (l'annexe N) concernant la différence entre différentes

sources d'humectation. Les moyennes de la quantité d'eau libre retenue par la surface foliaire (F1, F2, F3) en fonction de trois sources d'humectation (rosée, pluie et humectation artificielle) est significative ($p < 0,05$).

Tableau II-2-7. Résultats de la détermination de la quantité maximale *(C_1)* d'eau libre retenue par les feuilles de blé d'hiver en fonction de différentes sources d'humectation (en cm³ d'eau/cm² de feuille). Toutes feuilles et variétés confondues.
Determination of the maximum water storage for an average leaf in winter wheat canopy (C_1): for four winter wheat cultivars and for L1, L2 and L3.

Humectation	Nombre d'échantillons	Moyenne	MIN	MAX
Dew	168[b]	0,009	0,0032	0,0548
Rain	168	0,009	0,0032	0,0243
Spray[a]	168	0,013	0,0003	0,0312

[a] Humectation artificielle à l'aide d'un pulvérisateur.
[b] Nombre de feuilles sélectionnées pour la détermination de la quantité d'eau libre retenue par les feuilles F1, F2 et F3 en fonction de différentes sources d'humectation.

4. CONCLUSIONS

Les principaux points qui ressortent de l'analyse :

- Trois capteurs d'humectation ont été utilisés pour la détermination de la durée d'humectation. Les capteurs ont été calibrés par des données d'observation visuelle durant différents événements de rosée et de pluie qui sont survenus entre avril et juillet 2006 et 2007. La calibration a été faite dans un environnement de petites parcelles. Pour le cas étudié, les capteurs ont, en général, tendance à mieux détecter le début de la rosée (avec une erreur inferieure à 1 heure) que l'assèchement des feuilles dans le couvert. L'erreur dans ce dernier cas est légèrement supérieure mais généralement inférieure à 1 heure et, en moyenne, les capteurs détectent la fin de l'humectation avant l'assèchement des feuilles dans le couvert. Les valeurs de MAE indiquent en général une faible variabilité entre les valeurs mesurées et observées du début de la rosée. Cette variabilité est plus importante dans le cas de dessèchement du couvert. Pour la durée totale d'humectation, l'erreur moyenne pour les deux saisons culturales est proche d'1 heure. La durée d'humectation mesurée par les capteurs est modérément sous-estimée par rapport à celle observée.

- L'analyse des résultats de la comparaison de la quantité d'eau libre interceptée par les feuilles *(C_1)* de quatre variétés du blé d'hiver testées montre une différence significative entre les variétés. Une valeur maximale de 0,06 cm³/cm² a été retenue par unité de surface foliaire pour la culture de blé. Cette valeur sera utilisée pour la détermination de la quantité maximale d'eau libre pouvant être interceptée par le couvert *($C = C_1 * LAI$)*.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableaux :

Tableau II-2-1. Caractéristiques du site d'essai d'Arlon..... 114
Tableau II-2-2. Nombre d'événements de début d'humectation (wetness onset), de fin d'humectation (wetness dry-off) et de durée totale d'humectation (wetness duration) observés (Obs.) et mesurés à l'aide de trois capteurs d'humectation (Sen-1, Sen-2 et Sen-3) et qui sont survenus durant les saisons culturales 2006 et 2007.....124
Tableau II-2-3. Comparaison entre les données d'observation et de mesure du début d'humectation (wetness onset) due à la rosée. Le début d'humectation a été mesuré par trois capteurs (Sen-1, Sen-2 et Sen-3) dans un couvert de blé d'hiver en 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon.....125
Tableau II-2-4. Comparaison entre les données d'observation et de mesure de la fin d'humectation (wetness dry-off). La fin d'humectation a été mesurée par trois capteurs (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) dans un couvert de blé d'hiver en 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon. 126
Tableau II-2-5. Comparaison entre les données d'observation et de mesure de la durée d'humectation. La durée d'humectation a été mesurée par trois capteurs (Sen-1, Sen-2 et Sen-3) dans un couvert de blé d'hiver en 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon. 127
Tableau II-2-6. Résultat de la détermination de la quantité d'eau libre (en cm^3 d'eau/cm^2 de feuille) retenue par les feuilles de quatre variétés différentes de blé d'hiver : toute source d'humectation confondue.....129
Tableau II-2-7. Résultat de la détermination de la quantité d'eau libre retenue par les feuilles de blé d'hiver en fonction de différentes sources d'humectation (en cm^3 d'eau/cm^2 de feuille). Toutes feuilles et variétés confondues.....130

Figures :

Figure II-2-1. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour le suivi de la durée d'humectation sur diverses variétés mises en essais sur le site d'Arlon durant la campagne de mesures 2006. Quatre variétés ont été semées en bloc. Chaque bloc est constitué d'un ensemble de quatre variétés. Le schéma illustre l'emplacement de la station météo. 115
Figure II-2-2. Schéma du capteur de durée d'humectation de type 237.. 118
Figure II-2-3. Méthodologie de la détermination de la durée d'humectation. Schéma de l'installation des capteurs d'humectation, de température, d'humidité relative, du rayonnement. Tous les capteurs sont reliés à un acquisiteur de données (Grant-Logger Type 1F8). 119
Figure II-2-4. Méthodologie de détermination de la quantité de l'eau libre retenue par la surface foliaire de la culture de blé d'hiver. (a) Exemple de calcul de la surface de la feuille à l'aide de logiciel Assess. (b) Les échantillons de feuilles récoltés. (c) un support de fond bleu pour la prises des images à l'aide d'un appareil photo-numérique (d) Détermination de la surface foliaire à l'aide du logiciel *Assess*. 121
Figure II-2-5. Variation de l'écart-type (SD) en fonction de la moyenne (Mean) des durées d'humectation mesurées par trois capteurs en 2006 et 2007..... 123

RÉFÉRENCES

Bhatia, A., and Munkvold, G. P. (2002). Relationships of environmental and cultural factors with severity of gray leaf spot in maize. *Plant Disease* **86**, 1127-1133.

Burrage, S. W. (1972). Dew on wheat. *Agricultural Meteorology* **10**, 3-12.

Ciancio, A., and Mukerji, K. G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601. 359 pages.

Dalla Marta, A., Martinelli, L., and Orlandini, S. (2008). Leaf wetness spatial variability within grapevine canopy. *American Journal of Enology and Viticulture* **59**, 78-82.

Gillespie, T. J., and Kidd, G. E. (1978). Sensing duration of leaf moisture retention using electrical impedance grids. *Can. J. Pl. Sci* **58**, 179-187.

Huber, L. (1992). Déterminisme et mesure de la durée d'humectation en vue de la

protection des plantes. *Agronomie* **12**, 281-295.

Huber, L., and Gillespie, T. J. (1992). Modeling leaf wetness in relation to plant-disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology* **30**, 553-577.

James, W. C. (1976). "Manual of plant growth stages and diseases assessment keys," Ministry of Agriculture Fisheries. Food.

Jones, A. L. (1986). Role of wet periods in predicting foliar diseases. *In : Plant disease epidemiology. Population dynamics and management (KJ Leonard, WE Fry, eds)* ***I****, 87-100*.

Lau, Y., Gleason, M., Zriba, N., Taylor, E., and Hinz, P. (1999). Effects of coating, angle, and compass orientation on performance of wetness sensors during dew periods. *Plant Disease* **84**, 192-197.

Lulu, J., Sentelhas, P. C., Pedro, M. J., Pezzopane, J. R. M., and Blain, G. C. (2008). Spatial variability of leaf wetness duration in a 'niagara rosada' vineyard. *Engenharia Agricola* **28**, 104-114.

Magarey, R. D., Seem, R. C., and Russo, J. M. (2006). Grape canopy surface wetness: Simulation versus visualization and measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 361-372.

Magarey, R. D., Weiss, A., Gillespie, T. J., Huber, L., and Seem, R. C. (2005). Estimating surface wetness on plants. In: Hatfield, J.L., Baker, J.M., Viney, M.K. (Eds.), Micrometeorological measurements in Agricultural systems. *American Society of Agronomy, Madison, WI*.

Miranda, R. A. C., Davies, D. D., and Cornell., S. E. (2000). A laboratory assessment of wetness sensors for leaf, fruit and trunk surfaces. *Agric. For. Meteorol.* **102**, 263-274.

Pedro, M. J., and Gillespie, T. J. (1982). Estimating dew duration. II. Utilizing standard weather station data. *Agricultural Meteorology* **25**, 297-310.

Potratz, K. J., Gleason, M. L., Hockmuth, M. L., Parker, S. K., and Pearston, G. A. (1994). Testing the accuracy and precision of wetness sensors in a tomato field and turfgrass. *J. Iowa Acad. Sci.* **101**, 56-60.

Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Batzer, J. C., Gleason, M. L., Monteiro, J., Pezzopane, J. R. M., and Pedro, M. J. (2005). Spatial variability of leaf wetness duration in different crop canopies. *International Journal of Biometeorology* **49**, 363-370.

Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Gleason, M. L., Monteiro, J., and Helland, S. T. (2004a). Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 59-72.

Sentelhas, P. C., Monteiro, J., and Gillespie, T. J. (2004b). Electronic leaf wetness duration sensor: why it should be painted. *International Journal of Biometeorology* **48**, 202-205.

Tomerlin, J. R., and Howell, T. A. (1988). Distrain - a computer-program for training people to estimate disease severity on cereal leaves. *Plant Disease* **72**, 455-459.

Weiss, A., and Hagen, A. F. (1983). Further experiments on the measurements of leaf wetness. *Agricultural Meteorology* **29** 207-212.

Zadoks, J. C., Chang, T. T., and Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* **14**, 415-421.

PARTIE II

Chapitre 3

Détermination de la durée d'humectation par le modèle SWEB : simulation versus observations et mesures

RÉSUMÉ

Dans des réseaux des stations agrométéorologiques, l'humectation des surfaces végétales est généralement mesurée à l'aide d'un capteur, toutefois la simulation peut constituer une alternative prometteuse à la mesure de cette variable. L'objectif de cette étude est d'évaluer un modèle de simulation de la durée d'humectation à la surface des feuilles en culture de blé d'hiver. Le modèle choisi pour cette étude, appelé SWEB, se base sur le bilan énergétique et le bilan hydrique. Il simule la durée d'humectation due à la pluie et à la rosée sur l'ensemble du couvert végétal à partir des données issues des stations agrométéorologiques. Le modèle a été testé sur différentes variétés de blé d'hiver. Les données de simulation ont été comparées statistiquement aux mesures des capteurs (préalablement calibrés) et aux données d'observation obtenues sur des parcelles d'essai durant les saisons culturales 2006 et 2007. L'analyse de sensibilité montre que le modèle est sensible aux paramètres W_{max}, C_1 et LAI. Le modèle est également sensible aux variations de l'humidité relative et du rayonnement net. L'analyse des résultats fait apparaître que le modèle SWEB semble sous-estimer la durée d'humectation et plus particulièrement il simule des fins d'épisode d'humectation (dry off) trop précoces.

Mots clés : *Durée d'humectation superficielle, Couvert de blé d'hiver, Simulation, SWEB, Analyse de sensibilité.*

1. INTRODUCTION

La présence de l'eau libre à la surface du couvert végétal, due à la pluie ou à la rosée (appelée aussi l'humectation), joue un rôle fondamental dans l'épidémiologie des plantes (Campbell et Madden, 1990; Huber, 1992). Au même titre que la température, la durée d'humectation constitue une variable agrométéorologique importante dans de nombreux systèmes

d'avertissements agricoles (Gleason et al., 2008; Huber, 1992; Jones, 1986; Lulu et al., 2008; Rao et al., 1998). Pourtant, malgré son importance pour la simulation et la prévision des risques épidémiques, il n'existe pas de méthode standard pour sa détermination.

Bien que les capteurs soient largement utilisés pour mesurer la durée d'humectation, il existe néanmoins des limitations liées à leur utilisation (comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent). En effet, les capteurs donnent une mesure indirecte et parfois approximative de l'humectation réelle de la feuille et le bilan d'énergie d'un capteur est différent de celui d'un organe végétal. Ces capteurs nécessitent une calibration et une installation spécifique pour chaque culture (Chtioui et al., 1999; Getz, 1991; Giesler et al., 1996; Lomas et Shashoua, 1969; Sentelhas et al., 2004; Weiss et Lukens, 1981). En outre, le capteur est peu représentatif de la variabilité importante existante au niveau du couvert végétal (Dalla Marta et al., 2008; Santos et al., 2008; Sentelhas et al., 2005). Ces limitations ont encouragé des chercheurs à explorer des approches alternatives parmi lesquelles la simulation. Plusieurs modèles de simulation ont été développés pour la détermination de la durée d'humectation, mais peu d'entre eux ont été utilisés pour des applications agrométéorologiques opérationnelles à l'heure actuelle en raison de leur complexité. La littérature fournit plusieurs modèles de détermination de la durée d'humectation. Il existe des modèles de type empirique qui visent à simuler la durée d'humectation par des méthodes statistiques (Dalla Marta et al., 2005a; Gleason et al., 1994; Kim et al., 2002; Kim et al., 2005; Rao et al., 1998) et d'autres de type physique qui tentent de décrire conceptuellement les relations entre les facteurs responsables de l'humectation et son expression (Bass et al., 1991; Luo et Goudriaan, 2000; Papastamati et al., 2004; Pedro, 1980). Dernièrement un modèle de la durée d'humectation, appelé SWEB, a été développé à l'Université de Cornell aux États-Unis (Magarey, 1999). Dans cette étude, le modèle SWEB conçu pour la simulation de la durée d'humectation (Magarey, 1999; Magarey et al., 2005a) pour les grappes de vigne *(Vitis vinifera)* a été évalué pour la simulation de la durée d'humectation au niveau du couvert de blé d'hiver. Le but de cette étude est d'adopter une méthodologie de la détermination de la durée d'humectation à la surface des feuilles dans un couvert de blé d'hiver afin de mieux contrôler les périodes d'infection de *S. tritici*.

Dans ce chapitre nous procédons d'abord à une étude de sensibilité de la durée d'humectation simulée par le modèle SWEB en fonction des données météorologiques d'entrée et des paramètres caractérisant le couvert végétal. Cette étude s'avère indispensable avant de procéder à l'application du modèle à l'échelle locale. Ensuite, nous comparons statistiquement

(analyse quantitative et qualitative) les données simulées par le modèle aux observations visuelles (données de référence) et aux mesures prises par les capteurs de mouillure.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Le choix du site d'essai, du protocole expérimental et méthodologie de mesure

Les essais ont été suivis pendant deux années successives 2006 et 2007. La description et les caractéristiques du site d'essai et le protocole expérimental ont été détaillés dans le chapitre II de cette deuxième partie (cf. 2.1 et cf. 2.2 - Partie II-Chapitre 2).

2.2. SWEB : modèle de la simulation de la durée d'humectation

Le modèle SWEB (décrit en détail dans le paragraphe cf. 3.3 - Partie II -Chapitre 1) a été choisi pour la simulation de la durée d'humectation pour la culture du blé d'hiver. Le modèle détermine la durée d'humectation à un pas de temps horaire. Il permet de calculer la fraction mouillée de la surface du couvert végétal, W (actual fraction of wet area to the total surface area of the canopy) à partir du rapport entre la rétention en eau du couvert, S (Canopy water storage) et la quantité d'eau maximale qui peut être retenue par le couvert, C. Le modèle considère que le couvert est mouillé si la fraction mouillée de la surface végétale est supérieure à une valeur seuil. La valeur seuil (W_{th}) a été fixée à 10% sur les conseils des concepteurs du modèle.

Les équations du modèle SWEB sont représentées dans les annexes (Annexe D). L'annexe E donne les différentes étapes de la simulation de la durée d'humectation par le modèle. Les données d'entrée du modèle sont représentées en annexe (Annexe F).

Afin d'adapter le modèle SWEB à nos conditions météorologiques locales (à l'échelle du G-D de Luxembourg et à la culture du blé d'hiver), nous avons modifié une hypothèse de base du modèle (Magarey et al., 2006a) concernant le bilan d'énergie. Cette hypothèse de base[(1)] néglige la contribution du rayonnement net à l'évaporation, durant la journée, de l'eau à la surface des grappes de vigne (la culture sur laquelle le modèle a été calibré et validé). Le rayonnement net ne contribue qu'au phénomène de condensation durant la nuit (Magarey et

[1] According to the original assumptions of the model, daytime net radiation is assumed not to contribute to evaporation in a shaded grape canopy. This assumption is based upon the fact that the first sunlit leaf layer in a grape canopy absorbs 94% of the incoming solar radiation. It is important to note that while net radiation is assumed to play no role in daytime evaporation, it does contribute to nighttime condensation (Magarey 1999).

al., 2006a). L'équation du bilan d'énergie dans ce cas est donnée par l'équation (10) (Annexe D). Pour un couvert de blé, le rayonnement net journalier contribue à l'évaporation. En conséquence, nous avons modifié l'équation du bilan d'énergie en introduisant le rayonnement net dans l'équation (10) (Annexe D). L'équation finale utilisée est l'équation (9) (Annexe D).

Plusieurs paramètres du modèle ont aussi été adaptés pour mieux correspondre aux caractéristiques du couvert du blé d'hiver. Le tableau suivant donne les paramètres par défaut utilisés par le modèle SWEB (Version 0.28) et les paramètres modifiés pour le couvert de blé d'hiver.

Tableau II-3-1. Les paramètres par défaut et les paramètres modifiés du modèle SWEB pour le couvert de blé d'hiver.
Default and adjustment parameters of the SWEB model for winter wheat canopy.

Plant Parameters	Leaf Area Index	Reference height	Crop height	Max wet area	Max water storage per leaf area
Symbol	LAI	Z	Z_c*	W_{max}	C_1
Default	1	3		0.5	0.02
New	(*)	2 (**)		0.5	0.06
Unit		m	m	cm^2cm^{-2}	cm

* les valeurs de ces paramètres ont été ajustées au cours de la saison culturale (Figure II-3-1).
** la valeur de référence pour la mesure des variables météorologiques (Figure II.2.3)

2.3. Collecte des données d'entrée : variables météorologiques et les paramètres du couvert

Les variables météorologiques utilisées pour l'application du modèle sont des données horaires récoltées au niveau de la station agrométéorologique d'Arlon (cf. 2 Partie II-Chapitre 2). Les données de température de l'air, vitesse du vent, humidité relative et rayonnement net constituent les données d'entrée du modèle. Afin de vérifier la qualité des données d'entrée, les données météorologiques ont été traitées et analysées. On a utilisé, entre autres, les données de la station de l'Unité "Eau et Environnement" pour remplacer les données manquantes du rayonnement et de température de l'air.

Les données de l'indice foliaire *(LAI)* utilisées pour les paramètres d'entrée ont été obtenues dans le cadre d'une thèse de doctorat à l'Université de Liège (Mackels, 2008). Les données de *LAI* ont été récoltées durant les saisons culturales 2006 et 2007 sur le site d'Everlange au G-D de Luxembourg. La figure suivante donne les valeurs moyennes de LAI durant la saison culturale.

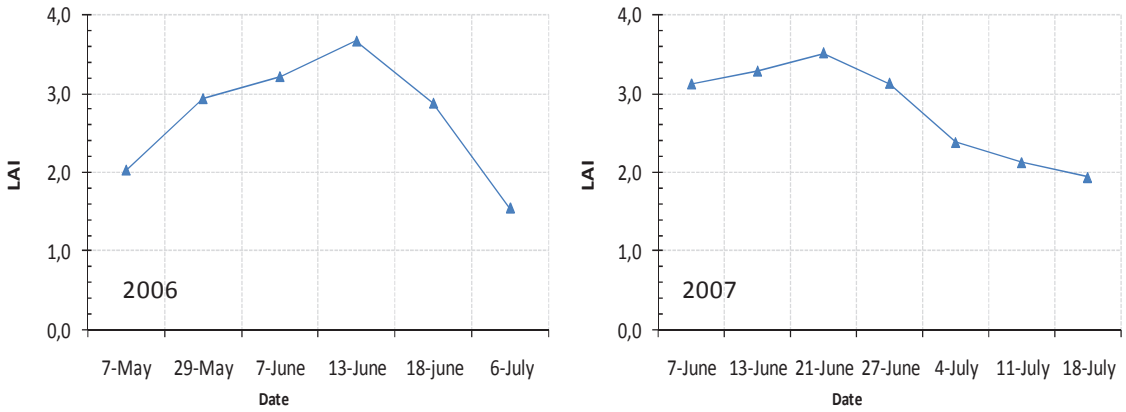


Figure II-3-1. Valeurs moyennes de *LAI* utilisées pour les paramètres d'entrée du modèle durant les saisons culturales 2006 et 2007.
LAI curve of winter wheat during the vegetative seasons 2006 and 2007.

La quantité d'eau libre retenue par chaque feuille exprimée en cm³ d'eau par cm² de surface de la feuille (le paramètre C_1 dans l'équation (6)-Annexe D) a été déterminée en laboratoire en testant différentes variétés de culture de blé d'hiver (cf. 3.3. Partie II-Chapitre 2). Une valeur de 0.06 est retenue comme quantité maximale d'eau libre par surface de feuille (C_1) pour l'application du modèle.

2.4. Analyse de sensibilité

Avant qu'un modèle de simulation puisse être utilisé à des fins prédictives, par exemple dans les modèles de prévision des risques épidémiologiques, sa sensibilité aux variables externes et internes doit être déterminée. L'analyse de sensibilité est utilisée pour identifier les facteurs qui manifestent une plus forte influence sur le processus à étudier, indiquant ainsi quels paramètres et variables d'entrée devraient être mesurés ou déterminés avec plus de précision et pour d'autres futures applications du modèle.

Afin de voir l'influence respective de différents paramètres, qu'il s'agisse de caractéristiques du couvert, paramètres physiques ou des variables météorologiques d'entrée, nous avons effectué une analyse de sensibilité du modèle. Cette dernière permet d'évaluer les performances du modèle, de déterminer sa sensibilité aux variables météorologiques qui influencent le cycle épidémique de la septoriose du blé d'hiver et de préciser aussi les paramètres qui devront être ajustés en priorité avant l'application du modèle à l'échelle régionale.

Deux types d'analyses de sensibilité ont été réalisés dans ce travail. Dans un premier temps nous avons étudié la sensibilité des principaux paramètres du modèle puis, dans un deuxième

temps, nous avons analysé la sensibilité du modèle aux variables météorologiques d'entrée de trois stations météorologiques situées dans différentes régions au G-D de Luxembourg.

2.4.1. Analyse de sensibilité des principaux paramètres du modèle

Le modèle SWEB peut être facilement adapté aux caractéristiques d'autres cultures par l'ajustement des quatre paramètres du couvert : *LAI* (Leaf Area Index), Z_c (crop height), W_{max} (Maximum wet area) et C_1 (Maximum water storage for an average leaf). Afin de voir l'influence de ces différents paramètres sur la durée d'humectation simulée, nous avons défini des conditions standard autour desquelles varieront séparément les paramètres analysés. Les conditions météorologiques standard retenues sont les suivantes : rayonnement net, R_n = 200 W/m², la vitesse du vent, U = 1.5 m/s, la température de l'air, T_a = 15 °C et l'humidité relative, HR = 80 %. Le pas de temps pour l'exécution du modèle est de 10 minutes. Nous avons initialisé le modèle par 2 mm de pluie au cours des 10 premières minutes et nous avons considéré qu'il ne pleuvait plus après. Le seuil d'humectation du couvert W_{th} a été fixé à 0.1.

2.4.2. Sensibilité du modèle aux variables météorologiques d'entrée

Le nombre d'heures humides simulé par le modèle (N_n) a été déterminé en faisant varier les valeurs de température (T °C), l'humidité relative (RH %), vitesse du vent (U m/s), rayonnement net (R_n W/m²) et pluie ($Rain$ mm). Ces cinq variables ont été choisies parce qu'elles constituent les variables météorologiques d'entrée. Dans notre exemple chaque variable d'entrée a subi une variation systématique de ±10% autour de la valeur initiale et le nombre N_n a été déterminé pour chaque mois.

Les données météorologiques utilisées pour l'étude de sensibilité du modèle aux variables météorologiques d'entrée sont des données horaires issues des trois stations automatiques situées dans différentes régions au G-D de Luxembourg (Tableau II-3-2). Les données de la température de l'air, la vitesse du vent, humidité relative et le rayonnement net ont été obtenues à partir de la base de données des stations automatiques de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) et du Centre de Recherche public Gabriel Lippmann (CRP-GL). Les données sont analysées et traitées. Les données manquantes ont été remplacées par les données des stations les plus proches. La période de mars à juillet 2001 a été choisie pour cette étude. C'est une période critique de l'année pour le développement des principales maladies cryptogamiques et particulièrement la septoriose du blé.

Le modèle a été ré-exécuté et la différence entre les heures humides simulées par le modèle par défaut (le modèle sans aucune modification des variables initiales), N_{ndef}, et les valeurs simulées par le modèle ajusté (le modèle avec les variables météorologiques modifiées), N_{nnew} a été déterminée. La somme des valeurs absolues de ces différences a été calculée pour chaque mois, en considérant S_+ et S_- comme la sensibilité respective pour tout changement positif et négatif des variables :

$$S_+(ou\ S_-) = \sum \left| N_{ndef} - N_{nnew} \right| \tag{1}$$

La détermination de la sensibilité de la durée d'humectation simulée aux variations des données météorologiques durant cette période s'avère très importante. Cette étude a été faite pour comparer, d'une part l'influence de la température, la vitesse du vent et l'humidité relative sur la durée d'humectation simulée, et d'autre part pour déterminer la variation saisonnière et spatiale de cette durée d'humectation.

Tableau II-3-2. Situation géographique des stations météorologiques.
Geographic description of weather station sites.

Station	Région	Longitude	Latitude	Altitude (m)
1. EVERLANGE	District de Diekirch	49° 46' 27N	5° 57' 20E	274
3. OBERCORN	District de Luxembourg	49° 30' 49N	5° 53' 46E	353
4. SCHIMPACH	District de Diekirch	50° 0' 37N	5° 51' 8E	483

2.5. Méthodologie d'analyse de données de simulation par le modèle SWEB

Pour l'évaluation du modèle SWEB, les données de simulation ont été comparées statistiquement aux mesures et observations des événements de début d'humectation (hours of dew onset), de fin d'humectation (hours of dry-off) et de durée totale d'humectation.

Dans un premier temps, pour une analyse quantitative des données, nous avons calculé l'erreur moyenne (ME) et l'erreur moyenne absolue (MAE) pour chaque événement de rosée ou de pluie. Les valeurs de ME et MAE ont été calculées à partir des équations suivantes :

$$ME = \frac{\sum_0^n (v_{o/m} - v_s)}{n} \tag{2}$$

$$MAE = \frac{\sum_0^n (\left| v_{o/m} - v_s \right|)}{n} \tag{3}$$

avec : n = le nombre de données (observé, mesuré ou simulé) ; $v_{o/m}$ = les valeurs observées (v_o) ou mesurées (v_m) ; v_s : les valeurs simulées. En plus, pour la comparaison de la durée d'humectation totale nous avons calculé également le coefficient de détermination R^2 par l'analyse de régression. La méthodologie de l'observation des événements de l'humectation est décrite dans le chapitre précédent (cf. 2. Partie II-Chapitre 2).

Dans un deuxième temps, une seconde analyse statistique a été faite pour comparer l'occurrence des heures d'humectation observée, mesurée par les capteurs et estimée par le modèle. Pour cette comparaison, le nombre d'heures correctement classé comme sec et humide a été déterminé et analysé en se basant sur la méthode de vérification des tableaux de contingence (Wilks, 1995). Les indices statistiques, calculés à partir de ces tableaux de contingence sont : la probabilité de détection (POD), la part de fausses alertes (FAR) et PNE[2] (Probability of Null Event). Le dernier indice est le BIAS qui donne le rapport entre le nombre d'événements prévus et les événements observés. Il permet d'évaluer la sous-estimation et la sur-estimation d'épisodes d'humectation données par le modèle.

Tableau II-3-3. Tableau de contingence.
2x2 contingency table.

	Simulated yes	Simulated no
Observed/measured yes	Hits (H)	Misses (M)
Observed/measured no	False alarms (FA)	Correct negatives (CN)

$$POD = \frac{H}{H+M} \; ; FAR = \frac{FA}{H+FA} \; ; \; CSI = \frac{H}{H+M+FA} \; ; \; PNE = 1 - \frac{FA}{FA+CN} \; ; BIAS = \frac{H+FA}{H+M}$$

3. RÉSULTATS

3.1. Analyse de sensibilité du modèle SWEB

3.1.1. Analyse de sensibilité du modèle aux variations des paramètres caractérisant le couvert

La figure suivante (Figure II-3-2) donne l'évolution de la durée d'humectation à la surface du couvert (SWD) à différentes valeurs de W_{max} (a), C_1 (b), LAI (c) et Z_c (d) pour des valeurs standard de R_n, U, de T_a et RH. Les résultats permettent de constater que W_{max}, C_1 et LAI semblent avoir une influence beaucoup plus grande sur la durée d'humectation que le paramètre Z_c.

[2] The PNE represent the probability that an occurred non-event (dryness) was correctly simulated.

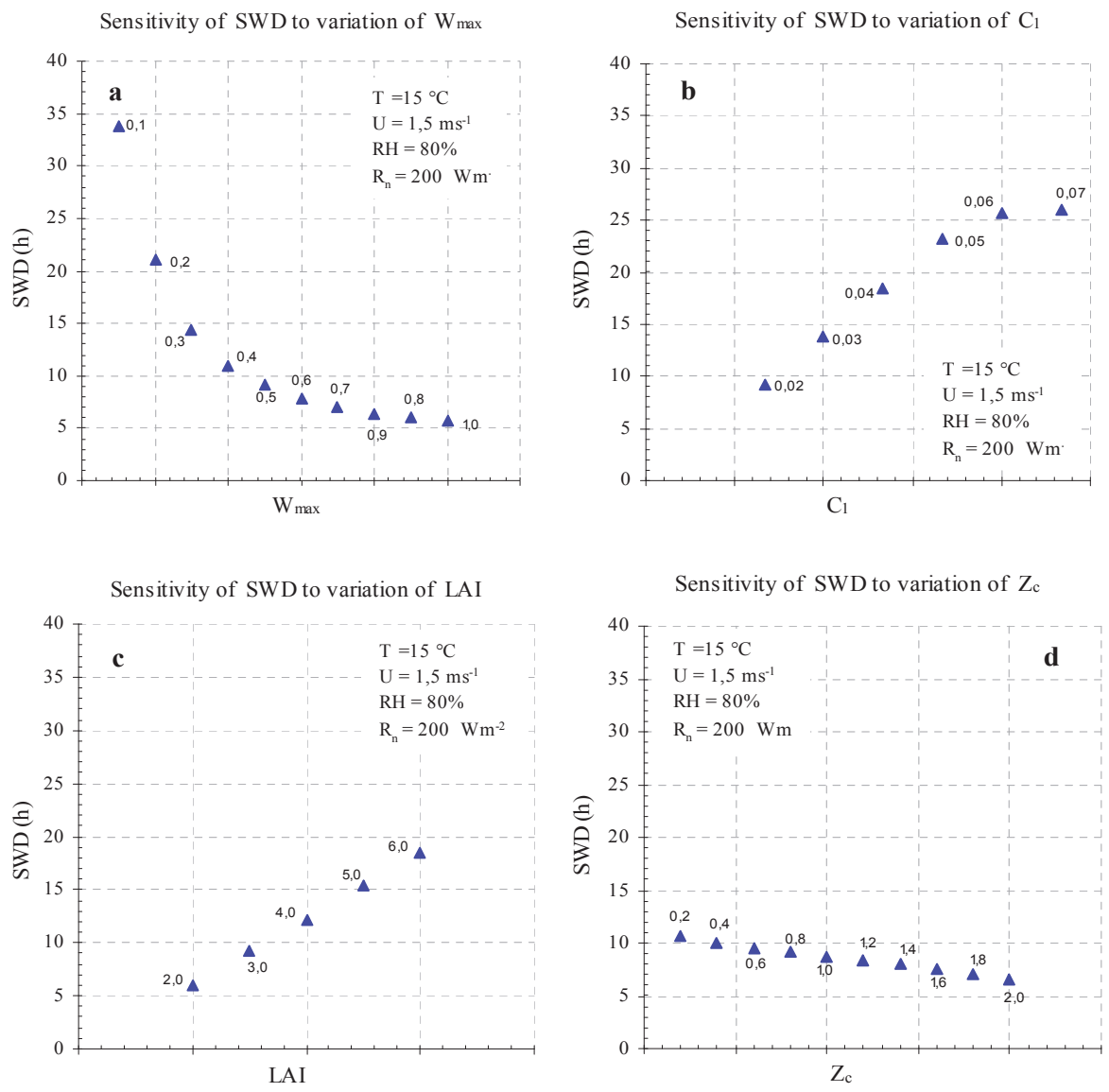


Figure II-3-2. Évolution de la durée d'humectation à la surface du couvert (SWD) pour différentes valeurs de W_{max} (a), C_1 (b), LAI (c) et Z_c (d) pour des valeurs standard de R_n, U, T_a et RH.
Influence of plant input parameters on simulated surface wetness duration (SWD). Plant parameters are maximum fraction of canopy allowed as wet surface area, W_{max} (a); maximum water storage per unit surface area, C_1 (b); leaf area index, LAI (c) and crop height, Zc (d). Standard values are used for R_n, U, T_a and RH.

En effet, une variation de W_{max} comprise entre 0.1 et 1 engendre une variation de *SWD* de 33.8 heures à 5.7 heures. De même pour C_1 et *LAI*, une variation entre 0.02 à 0.07 pour C_1 et de 2 à 6 pour *LAI*, produit une variation de SWD respectivement de 9.2 heures à 26 heures et 6 heures à 18.5 heures. Les valeurs de SWD par contre varient peu avec la variation de Z_c. Il en résulte que les valeurs des trois premiers paramètres seront cruciales pour l'application du modèle et donc que le modèle sera fort dépendant de leurs estimations précises.

3.1.2. Sensibilité aux variables météorologiques

La détermination de la sensibilité de la durée d'humectation simulée aux variations des données météorologiques durant cette période de la croissance de la culture du blé d'hiver s'avère très importante. En général, les modèles de simulation de la durée d'humectation sont très sensibles à l'humidité relative (Huber, 1987), modérément sensibles à la vitesse du vent et au rayonnement net (Papastamati et al., 2004) et relativement insensibles à la variation de la température (Jacobs et al., 2009; Magarey et al., 2006a; Scherm et van Bruggen, 1993).
Dans cette partie, nous avons essayé de déterminer l'influence de la variation des variables météorologiques sur la durée d'humectation simulée par le modèle SWEB dans trois régions différentes du G-D de Luxembourg (Tableau II-3-2). Cette étude a été faite pour comparer, d'une part l'influence de la température, la vitesse du vent et l'humidité relative sur la durée d'humectation simulée, et d'autre part pour déterminer la variation saisonnière et spatiale de cette durée d'humectation. Les stations météorologiques d'EVERLANGE, d'OBERCORN et de SCHIMPACH sont choisies pour étudier la variabilité spatiale (la différence entre les régions) de la sensibilité de la durée d'humectation simulée aux variations de température, d'humidité relative, de vitesse du vent et du rayonnement net pour l'année 2001 (Figure. II.3.3). La station d'EVERLANGE a été choisie pour étudier la variabilité temporelle (variation annuelle pour la même station) pour les périodes 2000 et 2001 (Figure. II.3.4).

La figure II.3.3 montre les résultats de la variation spatiale de la durée d'humectation dans les stations d'EVERLANGE, d'OBERCORN et de SCHIMPACH. Seules les valeurs moyennes (S_i) exprimées en heures ont été présentées dans la figure. Partant de ces résultats, nous ne constatons pas de tendance spatiale de la sensibilité du modèle. En revanche, les valeurs montrent que le modèle est plus sensible à l'humidité relative (*RH*). Une différence de 0.5 à 25 h (par mois) de durée d'humectation a été trouvée lorsqu'on diminue ou augmente l'humidité relative de 10%. Le modèle est beaucoup moins sensible à la température (*T*) (des différences de 0.5 à 2 h de durée d'humectation ont été trouvées) pour des variations de +/- 10% autour des températures observées. Les résultats montrent également que le modèle est modérément sensible aux variations de précipitations (*Rain*), du rayonnement (R_n) et de la vitesse du vent (*U*).
Les résultats font apparaître également que la sensibilité est similaire dans l'ensemble des stations étudiées. En effet, l'humidité relative est plus sensible que la vitesse du vent et la température pour les trois stations. Une différence de sensibilité est à noter entre les mois pour l'ensemble des stations.

Sensitivity of SWD to temperature (T), relative humidity (HR), net radiation (R_n) and wind speed (U)

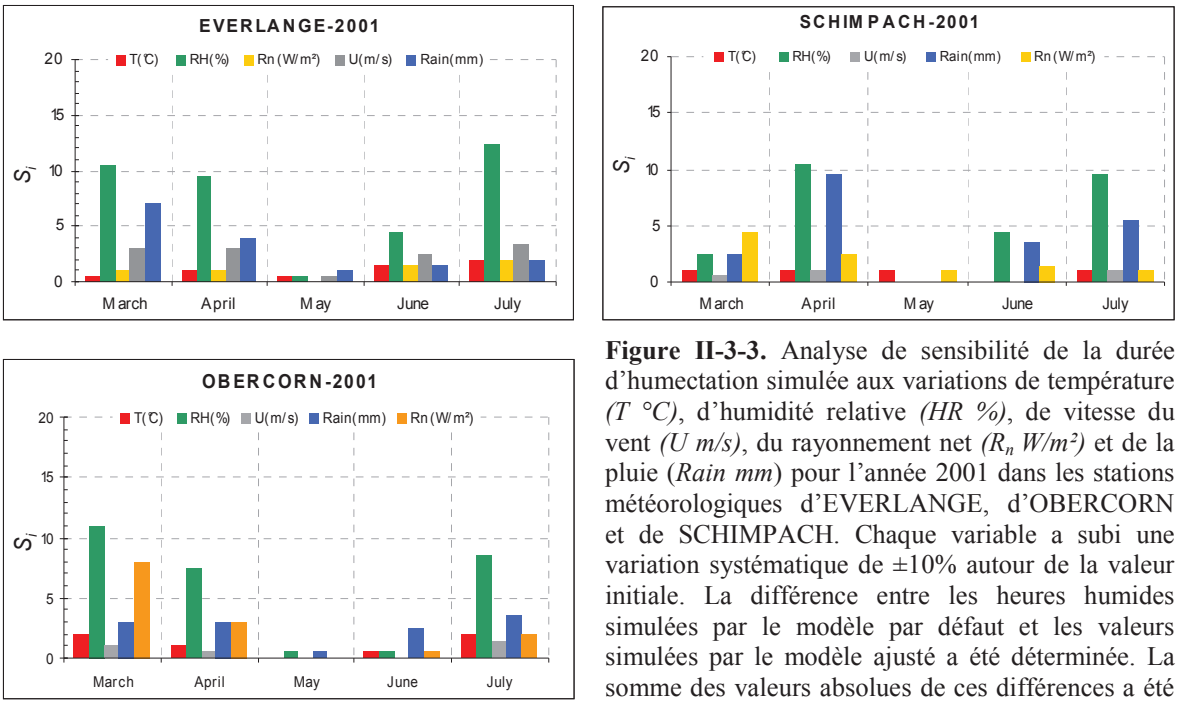


Figure II-3-3. Analyse de sensibilité de la durée d'humectation simulée aux variations de température *(T °C)*, d'humidité relative *(HR %)*, de vitesse du vent *(U m/s)*, du rayonnement net *(R_n W/m²)* et de la pluie (*Rain mm*) pour l'année 2001 dans les stations météorologiques d'EVERLANGE, d'OBERCORN et de SCHIMPACH. Chaque variable a subi une variation systématique de ±10% autour de la valeur initiale. La différence entre les heures humides simulées par le modèle par défaut et les valeurs simulées par le modèle ajusté a été déterminée. La somme des valeurs absolues de ces différences a été calculée pour chaque mois, en considérant S_+ et S_- comme la sensibilité respective pour tout changement positif et négatif des variables. S_i représente la valeur moyenne de S_+ et S_-.

Quant à la variation temporelle au cours de l'année et entre les années, les résultats (Figure. II.3.3 et Figure II.3.4) montrent une variation importante entre les mois d'une année et entre les années. Une nette différence s'observe en particulier si l'on regarde l'humidité relative.

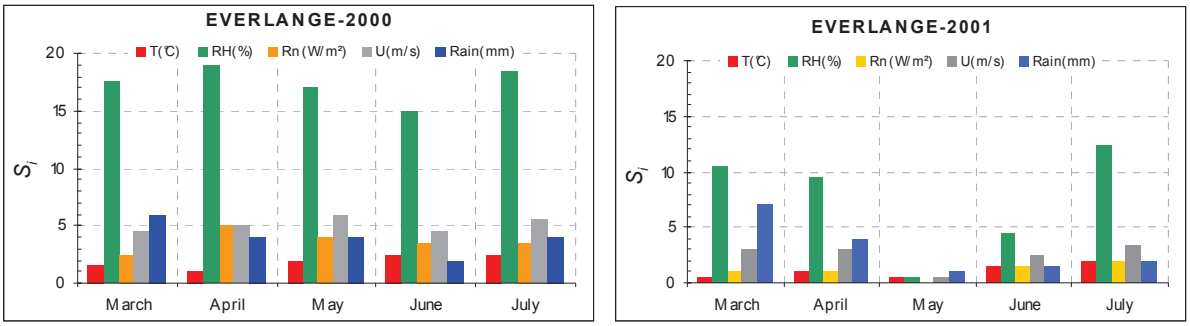


Figure II-3-4. Analyse de sensibilité de la durée d'humectation simulée aux variations de température *(T °C)*, d'humidité relative *(HR %)*, de vitesse du vent *(U m/s)*, du rayonnement net *(R_n W/m²)* et de la pluie (*Rain mm*) pour les saison culturales 2000 et 2001 à la station météorologique d'EVERLANGE. Chaque variable a subi une variation systématique de ±10% autour de la valeur initiale. La différence entre les heures humides simulées par le modèle par défaut et les valeurs simulées par le modèle ajusté a été déterminée. La somme des valeurs absolues de ces différences a été calculée pour chaque mois, en considérant S_+ et S_- comme la sensibilité respective pour tout changement positif et négatif des variables. S_i représente la valeur moyenne de S_+ et S_-.

3.2. Application du modèle SWEB : comparaison simulation-observation-mesure

Le modèle SWEB a été évalué par des données météorologiques horaires de la station d'Arlon sur un ensemble d'événements de pluie et de dépôt de rosée (Tableau II-3-4). L'évaluation a été faite pour les événements de début de dépôt de rosée (Dew onset), fin d'humectation

(wetness ending) et la durée totale entre le début et la fin d'humectation (wetness duration). Les temps de début et de fin d'humectation ainsi que la durée d'humectation totale simulée par le modèle (Sim.) ont été comparés aux données d'observation (Obs.) et aux mesures des capteurs (Sen.). L'évaluation a été faite durant deux saisons culturales successives, 2006 et 2007. Le tableau II-3-4 (Tableau II-3-4) donne une description du site d'essai qui a fourni les données utilisées pour l'évaluation du modèle de la durée d'humectation ainsi que le nombre d'événements qui sont survenus durant l'application du modèle.

Tableau II-3-4. Nombre d'épisodes de début, fin et durée d'humectation foliaire mesurés par trois capteurs Campbell 237 (Sen-1, Sen-2 et Sen-3), simulés par le modèle SWEB (Sim.) et observés visuellement (Obs.) qui ont été utilisés pour la suite des analyses.
Number of events of dew onset, ending of wetness and wetness duration on leaves measured by three flat plate sensors (Sen-1, Sen-2 and Sen-3), simulated with SWEB model (Sim.) and visually observed (Obs.) that were used for the following analysis.

Site	Location	Year	Events	Sensors (No. Deployed)	Cultivar	Dew onset					Ending of wetness					During of wetness				
						Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3	Sim.	Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3	Sim.	Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3	Sim.
Arlon-Station	Arlon	2006	Rain	Unpainted(3)	Flair	-	-	-	-	-	14	21	21	19	26	4	2	3	2	4
			Dew			17	19	21	17	26	12	21	22	21	23	10	8	9	8	10
			All			17	19	21	17	26	26	42	43	40	49	14	10	12	10	14
		2007	Rain	Painted(3)	Akteur	-	-	-	-	-	18	44	36	44	46	8	7	3	6	8
			Dew			9	24	22	21	25	10	19	19	18	20	7	5	6	4	6
			All			9	24	22	21	25	28	63	55	62	66	15	12	9	10	14

3.2.1. Analyse quantitative des données

Pour l'analyse quantitative des données, les indices statistiques ME (erreur moyenne) et MAE (erreur moyenne absolue) ont été utilisés pour la comparaison entre les valeurs de l'humectation simulées par le modèle (Sim.), visuellement observées (Obs.) et mesurées par trois capteurs d'humectation (Sen-1, Sen-2 et Sen-2). Les résultats de la comparaison entre valeurs simulées, mesurées et observées sont présentés dans les tableaux II-3-5, II-3-6 et II-3-7 (Tableau II-3-5, II-3-6 et II-3-7). L'analyse des résultats obtenus montre qu'en 2006, le MAE est de 38.4 minutes pour les événements de début de la rosée (Tableau II-3-5), de 161.5 minutes pour la fin de l'humectation (Tableau II-3-6) et de 1.29 heure pour la durée d'humectation (Tableau II-3-7). En 2007, les valeurs de MAE pour le début de la rosée, la fin d'humectation et la durée totale d'humectation sont respectivement 28.3 minutes, 130 minutes et 2.73 heures. Les résultats permettent de constater de toute évidence que le modèle simule avec plus de précision les événements de début d'humectation que de fin d'humectation au cours des deux saisons culturales. Les résultats font apparaître également que le modèle, en général, détecte le dépôt de rosée avant que celui-ci ne soit observé ou mesuré. Ceci est probablement dû à la résolution temporelle d'échantillonnage, i.e. le modèle donne une valeur d'humectation chaque heure alors que les observations sont faites par tranches de 15 minutes.

L'analyse des résultats montre aussi que le modèle sous-estime la durée totale d'humectation de 0.71 heure en 2006 et de 2.48 en 2007 (Tableau II-3-7).

Pour l'évaluation de la simulation de la durée d'humectation totale nous avons aussi calculé le coefficient de détermination R^2 (Tableau II-3-7) pour chaque saison culturale. La corrélation entre les données observées, mesurées et simulées des périodes d'humectation est statistiquement significative ($p < 0.05$) avec $R^2 = 0.80$ en 2006 et 0.55 en 2007.

Enfin, à la lecture des résultats obtenus, nous constatons une légère différence entre les deux sources d'humectation et, dans les deux cas, moins de précision dans la simulation des périodes de fin d'humectation.

Tableau II-3-5. Comparaison entre les données d'observation (Obs.), de mesure (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) et de simulation (Sim.) du début d'humectation (wetness onset) due à la rosée. Le début d'humectation a été mesuré par trois capteurs et simulé par le modèle SWEB dans un couvert de blé d'hiver en 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon.

Comparison of observed (Obs.), measured (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) and simulated (Sim.) wetness start (caused by dew). The wetness was measured by three flat plate sensors and simulated by SWEB model over wheat canopy at the agrometeorological station of Arlon, during May-July in 2006 and April-July 2007.

Year	Date	Wetness source	Dew onset								
			Time[(1)]					Differences (min)			
			Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3	Sim.	Obs. vs Sim.	Sim. vs Sen-1	Sim. vs Sen-2	Sim. vs Sen-3
2006	4-5 May	Dew	22:15	-	-	-	22:00	15	-	-	-
	6-7 May	Dew	23:00	-	-	-	23:00	0	-	-	-
	11-12 May	Dew	22:15	22:03	23:17	-	23:00	-45	-57	17	-
	15-16 May	Dew	22:13	-	-	-	0:00	47	-	-	-
	28-29 May	Dew	0:00	23:59	23:59	0:00	0:00	0	-1	-1	0
	2-3 June	Dew	23:30	-	22:15	22:48	23:00	0	-	-45	-12
	3-4 June	Dew	23:15	23:30	23:33	23:31	23:00	15	30	33	31
	4-5 June	Dew	0:15	23:47	23:56	-	22:00	135	107	116	-
	5-6 June	Dew	1:00	0:29	0:23	1:53	23:00	120	89	83	173
	6-7 June	Dew	0:30	0:25	23:30	-	23:00	90	85	30	-
	7-8 June	Dew	+	-	1:55	0:56	23:00	+	-	175	116
	16-17 June	Dew	23:00	22:25	21:59	22:22	23:00	0	-35	-61	-38
	17-18 June	Dew	23:00	22:08	22:30	23:00	23:00	0	-52	-30	0
	22-23 June	Dew	23:15	23:18	23:11	23:16	23:00	15	18	11	16
	26-27 June	Dew	22:15	-	-	-	23:00	-45	-	-	-
	27-28 June	Dew	22:25	23:13	23:03	22:15	23:00	-35	13	3	-45
	30 June-1 July	Dew	22:30	22:43	22:46	21:53	23:00	-30	-17	-14	-67
	2-3 July	Dew	1:00	1:27	1:27	1:42	0:00	60	87	87	102
	4-5 July	Dew	+	0:17	-	1:37	2:00	+	-103	-	-23
	7-8 July	Dew	+	23:37	23:27	1:47	2:00	+	-143	-153	-13
	9-10 July	Dew	+	0:23	23:22	3:17	0:00	+	23	-38	197
	10-11 July	Dew	+	1:02	0:47	1:12	1:00	+	2	-13	12
	12-13 July	Dew	+	0:47	23:52	-	0:00	+	47	-8	-
	13-14 July	Dew	+	-	1:47	1:22	1:00	+	-	47	22
	19-20 July	Dew	+	3:12	4:32	3:32	1:00	+	132	212	152
	26-27 July	Dew	+	1:07	0:57	-	1:00	+	7	-3	-
	ME							20.1	12.2	21.3	36.6
	MAE							38.4	55.2	56.2	59.9
2007	21-22 April	Dew	22:45	23:13	23:40	22:42	0:00	-75	-47	-20	-78
	22-23 April	Dew	21:45	21:30	22:00	22:00	22:00	-15	-30	0	0
	23-24 April	Dew	+	1:24	1:26	1:23	23:00	+	144	146	143
	24-25 April	Dew	21:30	-	-	-	22:00	-30	-	-	-
	25-26 April	Dew	22:00	22:05	22:46	22:06	22:00	0	5	46	6
	26-27 April	Dew	21:45	21:15	-	21:10	22:00	-15	-45	-	-50
	27-28 April	Dew	21:30	21:00	-	21:35	22:00	-30	-60	-	95
	28-29 April	Dew	+	20:16	21:23	21:23	22:00	+	-104	-37	-37
	29-30 April	Dew	+	0:08	23:58	23:35	22:00	+	128	118	95
	2-3 May	Dew	23:45	22:47	21:53	23:30	23:00	45	-13	-67	30
	3-4 May	Dew	+	20:42	20:21	22:31	23:00	+	-138	-159	-29
	5-6 May	Dew	+	1:50	1:50	2:03	23:00	+	170	170	183
	6-7 May	Dew	+	0:35	2:53	-	2:00	+	-85	53	-
	10-11 May	Dew	+	21:31	21:31	21:34	21:00	+	31	31	34
	29-30 May	Dew	+	23:14	23:21	23:40	22:00	+	74	81	100
	3-4 June	Dew	22:15	21:28	21:28	-	22:00	15	-32	-32	-
	4-5 June	Dew	+	2:05	3:00	-	1:00	+	65	120	-
	13-14 June	Dew	+	0:38	0:42	0:46	1:00	+	-22	-18	-14
	14-15 June	Dew	22:30	23:35	23:35	23:44	22:00	30	95	95	104
	19-20 June	Dew	+	1:03	1:02	1:03	1:00	+	3	2	3
	11-12 Juyl	Dew	+	23:05	23:05	1:00	22:00	+	65	65	180
	13-14 Juyl	Dew	+	0:05	22:05	0:15	22:00	+	125	5	135
	16-17 Juyl	Dew	+	1:35	1:05	1:05	2:00	+	-25	-55	-55
	17-18 Juyl	Dew	+	0:25	0:35	0:35	0:00	+	25	35	35
	21-22 Juyl	Dew	+	0:35	0:25	0:35	22:00	+	155	145	155
	ME							-8.3	20.2	32.9	49.3
	MAE							28.3	70.3	68.2	74.3

(1) Time when dew onset was visually observed on leaves, detected by sensor or simulated by model.
-, No data or missing data. +, No observation data.
ME: mean error. MEA: mean absolute error.
A positive value indicates earlier detection of LW onset, by the SWEB model as compared with the observation/sensors.
A negative value indicates delayed detection of LW onset, by the SWEB model as compared with the observation/sensors.

Tableau II-3-6. Comparaison entre les données d'observation (Obs.), de mesure (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) et de simulation (Sim.) de la fin d'humectation (wetness dry-off). La fin d'humectation a été mesurée par trois capteurs et simulé par le modèle SWEB dans un couvert de blé d'hiver en 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon.

Comparison of observed (Obs.), measured and simulated ending of wetness (caused by rain or dew). The wetness was measured by three flat plate sensors (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) and simulated by SWEB model (Sim.) over a wheat canopy at the agrometeorological station, Arlon, during May-July in 2006 and April-July 2007.

Year	Date	Wetness	Ending of wetness								
			Time[1]					Differences (min)			
		source	Obs.	Sen-1	Sen-2	Sen-3	Sim.	Obs. vs Sim.	Sim. vs Sen-1	Sim. vs Sen-2	Sim. vs Sen-3
2006	5/05/2006	Rain	10:30	-	-	-	8:00	150	-	-	-
	6/05/2006	Rain	10:00	-	7:48	7:49	9:00	60	-	-72	-71
	7/05/2006	Dew	9:00	-	-	-	8:00	60	-	-	-
	10/05/2006	Rain	7:00	-	-	-	6:00	60	-	-	-
	11/05/2006	Rain	11:00	9:50	9:24	-	9:00	120	50	24	-
	12/05/2006	Rain	9:30	8:06	7:28	-	8:00	90	6	-32	-
	13/05/2006	Rain	+	14:01	-	-	12:00	+	121	-	-
	24/05/2006	Dew	10:25	10:04	9:53	10:00	6:00	265	244	233	240
	27/05/2006	Rain	+	10:56	11:19	11:33	12:00	+	-64	-41	-27
	28/05/2006	Rain	+	9:07	9:14	9:33	10:00	+	-53	-46	-27
	29/05/2006	Rain	8:30	9:04	9:26	9:22	8:00	30	64	86	82
	30/05/2006	Rain	11:00	9:57	9:46	10:02	11:00	0	-63	-74	-58
	31/05/2006	Rain	10:30	-	-	-	-	-	-	-	-
	1/06/2006	Rain	11:00	-	10:48	12:17	6:00	300	-	288	377
	2/06/2006	Rain	10:30	10:10	10:09	10:43	6:00	270	250	249	283
	3/06/2006	Dew	9:40	9:18	9:21	9:42	6:00	220	198	201	222
	4/06/2006	Dew	+	8:18	8:42	7:02	6:00	+	138	162	62
	5/06/2006	Dew	9:00	9:06	9:10	9:41	7:00	120	126	130	161
	6/06/2006	Dew	9:40	8:27	8:46	7:40	6:00	220	147	166	100
	7/06/2006	Dew	8:15	6:31	7:58	8:05	6:00	135	31	118	125
	8/06/2006	Dew	7:00	5:53	7:25	7:35	6:00	60	-7	85	95
	9/06/2006	Dew	8:30	7:44	8:11	8:03	6:00	150	104	131	123
	10/06/2006	Dew	8:20	7:49	8:09	7:59	-	-	-	-	-
	11/06/2006	Dew	7:52	8:15	8:12	8:10	-	-	-	-	-
	12/06/2006	Dew	+	7:41	7:42	7:44	-	-	-	-	-
	13/06/2006	Dew	6:00	6:12	7:28	7:25	-	-	-	-	-
	16/06/2006	Rain	12:15	11:00	8:34	8:17	6:00	375	300	154	137
	17/06/2006	Dew	8:30	8:18	8:14	7:57	6:00	150	138	134	117
	18/06/2006	Dew	8:15	8:15	8:10	7:59	6:00	135	135	130	119
	19/06/2006	Rain	+	11:05	11:55	12:57	6:00	+	305	355	417
	20/06/2006	Rain	+	9:27	9:37	9:21	6:00	+	207	217	201
	21/06/2006	Dew	+	8:26	8:18	7:39	6:00	+	146	138	99
	23/06/2006	Dew	8:30	8:10	8:09	8:06	6:00	150	130	129	126
	24/06/2006	Dew	7:00	7:50	7:48	7:44	6:00	60	110	108	104
	25/06/2006	Rain	+	4:37	4:45	4:33	6:00	+	-83	-75	-87
	26/06/2006	Rain	13:15	-	-	-	9:00	255	-	-	-
	27/06/2006	Rain	11:30	-	-	-	-	-	-	-	-
	28/06/2006	Dew	8:30	8:21	-	7:38	-	-	-	-	-
	29/06/2006	Rain	13:00	10:47	10:26	12:07	8:00	300	167	146	247
	30/06/2006	Rain	9:15	9:15	8:25	8:28	6:00	195	195	145	148
	1/07/2006	Dew	8:30	8:05	7:57	7:50	-	-	-	-	-
	2/07/2006	Dew	+	7:17	7:37	6:12	5:00	+	137	157	72
	4/07/2006	Dew	+	7:02	7:52	5:07	5:00	+	122	172	7
	6/07/2006	Rain	+	8:37	9:12	8:02	6:00	+	157	192	122
	7/07/2006	Rain	10:30	8:47	10:12	8:17	6:00	270	167	252	137
	8/07/2006	Dew	+	8:02	8:27	7:47	5:00	+	182	207	167
	9/07/2006	Dew	+	7:42	8:32	6:57	5:00	+	162	212	117
	10/07/2006	Dew	+	8:57	9:37	8:37	6:00	+	177	217	157
	11/07/2006	Dew	+	7:57	8:12	7:32	5:00	+	177	192	152
	12/07/2006	Dew	+	6:57	7:22	-	5:00	+	117	142	-
	13/07/2006	Dew	+	7:02	8:02	6:42	6:00	+	62	122	42
	20/07/2006	Rain	+	7:57	7:02	6:32	5:00	+	177	122	92
	21/07/2006	Rain	+	8:32	7:32	7:07	5:00	+	212	152	127
	23/07/2006	Rain	+	10:37	10:37	10:12	6:00	+	277	277	252
	24/07/2006	Dew	+	-	7:37	7:42	6:00	+	-	97	102
	26/07/2006	Rain	+	7:07	7:42	-	6:00	+	67	102	-
	28/07/2006	Rain	+	13:57	-	13:37	10:00	+	237	-	217
	ME[2]							161.5	130.3	135.0	127.0
	MAE[2]							161.5	143.1	150.8	140.5
	ME[3]							143.8	132.2	153.8	119.5
	MAE[3]							143.8	132.9	153.8	119.5
	ME[4]							176.8	128.4	115.3	135.2
	MAE[4]							176.8	153.4	147.7	163.6
2007	21/04/2007	Dew	8:15	7:42	7:42	8:10	9:00	-45	-78	-78	-50
	22/04/2007	Dew	10:15	9:02	8:56	9:19	8:00	135	62	56	79
	23/04/2007	Dew	10:30	8:57	9:02	9:19	8:00	150	57	62	79
	24/04/2007	Dew		8:53	8:52	9:09	8:00	+	53	52	69
	25/04/2007	Dew	10:00	8:25	8:21	8:38	8:00	120	25	21	38
	26/04/2007	Dew	8:45	8:46	8:36	8:58	8:00	45	46	36	58
	27/04/2007	Dew	8:45	-	-	-	8:00	45	-	-	-
	28/04/2007	Dew	+	9:11	9:12	9:34	9:00	+	11	12	34
	29/04/2007	Dew	+	8:32	8:19	8:46	8:00	+	32	19	46

30/04/2007	Dew	+	4:45	8:08	7:28	9:00	+	-255	-52	-92
3/05/2007	Dew	8:00	8:00	7:55	7:54	7:00	60	60	55	54
4/05/2007	Dew	+	6:23	5:37	5:48	6:00	+	23	-23	-12
5/05/2007	Rain	+	7:19	7:17	7:19	6:00	+	79	77	79
6/05/2007	Dew	+	9:20	9:46	9:35	7:00	+	140	166	155
8/05/2007	Rain	+	9:44	9:35	9:20	9:00	+	44	35	20
10/05/2007	Rain	+	9:16	10:07	10:11	8:00	+	76	127	131
11/05/2007	Dew	+	6:47	6:47	6:45	6:00	+	47	47	45
12/05/2007	Rain	+	11:21	10:57	10:43	8:00	+	201	177	163
13/05/2007	Rain	10:00	-	-	-	6:00	240	-	-	-
14/05/2007	Rain	10:00	8:26	9:10	9:10	7:00	180	86	130	130
15/05/2007	Rain	12:15	10:04	11:02	11:41	8:00	255	124	182	221
20/05/2007	Rain	+	8:30	-	8:30	6:00	+	150	-	150
21/05/2007	Rain	12:00	10:19	-	9:24	7:00	300	199	-	144
22/05/2007	Rain	9:15	9:14	-	9:33	6:00	195	194	-	213
23/05/2007	Rain	8:30	9:32	-	9:33	6:00	150	212	-	213
24/05/2007	Rain	10:00	9:21	-	9:21	6:00	240	201	-	201
25/05/2007	Rain	9:00	9:30	-	9:35	6:00	180	210	-	215
26/05/2007	Rain	+	9:32	-	10:19	6:00	+	212	-	259
27/05/2007	Rain	+	11:53	-	11:45	10:00	+	113	-	105
28/05/2007	Rain	+	12:16	12:30	12:15	7:00	+	316	330	315
30/05/2007	Dew	+	8:49	9:17	9:05	7:00	+	109	137	125
31/05/2007	Rain	13:15	12:37	13:24	13:17	11:00	135	97	144	137
2/06/2007	Rain	+	10:23	10:42	10:45	8:00	+	143	162	165
3/06/2007	Dew	+	8:34	8:50	8:50	6:00	+	154	170	170
4/06/2007	Dew	9:45	9:52	9:12	10:11	7:00	165	172	132	191
5/06/2007	Dew	+	7:36	7:23	-	6:00	+	96	83	-
7/06/2007	Dew	7:00	6:24	6:29	6:21	6:00	60	24	29	21
11/06/2007	Rain	9:00	9:36	9:26	9:15	8:00	60	96	86	75
12/06/2007	Rain	+	8:17	8:14	8:26	9:00	+	-43	-46	-34
13/06/2007	Dew	9:30	9:47	9:54	9:40	6:00	210	227	234	220
14/06/2007	Rain	+	8:24	8:43	8:24	8:00	+	24	43	24
15/06/2007	Rain	8:30	7:52	7:58	8:17	10:00	-90	-128	-122	-103
16/06/2007	Rain	+	8:40	9:07	8:52	11:00	+	-140	-113	-128
18/06/2007	Rain	10:00	-	-	-	9:00	60	-	-	-
19/06/2007	Rain	10:00	8:41	10:43	8:45	8:00	120	41	163	45
20/06/2007	Rain	11:30	10:08	10:05	10:35	11:00	30	-52	-55	-25
21/06/2007	Rain	11:15	11:23	11:23	11:33	16:00	-285	-277	-277	-267
22/06/2007	Rain	11:45	11:22	10:30	10:12	10:00	105	82	30	12
24/06/2007	Rain	+	10:24	9:00	8:44	9:00	+	84	0	-16
25/06/2007	Rain	14:30	13:48	13:33	14:13	13:00	90	48	33	73
26/06/2007	Rain	+	14:43	14:47	15:20	15:00	+	-17	-13	20
28/06/2007	Rain	11:00	9:45	9:42	9:43	11:00	0	-75	-78	-77
30/06/2007	Rain	+	8:12	8:37	8:12	6:00	+	132	157	132
12/07/2007	Rain	+	7:25	7:15	8:05	6:00	+	85	75	125
13/07/2007	Rain	+	10:35	11:45	12:35	9:00	+	95	165	215
14/07/2007	Rain	+	8:45	8:55	8:25	6:00	+	165	175	145
15/07/2007	Rain	+	8:15	8:15	8:05	6:00	+	135	135	125
17/07/2007	Rain	+	8:25	8:05	8:25	7:00	+	85	65	85
18/07/2007	Rain	+	8:25	8:15	8:35	7:00	+	85	75	95
19/07/2007	Rain	+	13:25	12:45	11:55	10:00	+	205	165	115
20/07/2007	Rain	+	14:35	13:15	13:15	11:00	+	215	135	135
21/07/2007	Rain	+	10:15	9:55	9:55	7:00	+	195	175	175
22/07/2007	Rain	+	7:15	7:05	7:55	6:00	+	75	65	115
25/07/2007	Rain	+	8:55	8:55	9:05	9:00	+	-5	-5	5
26/07/2007	Rain	+	8:45	8:45	8:45	6:00	+	165	165	165
28/07/2007	Rain	+	13:05	13:05	13:05	11:00	+	125	125	125
ME[2]							103.9	80.3	69.9	87.9
MAE[2]							130.0	114.3	101.3	113.8
ME[3]							94.5	52.9	60.9	68.3
MAE[3]							103.5	87.9	77.1	85.4
ME[4]							109.2	92.2	74.6	95.8
MAE[4]							145.6	125.7	114.0	125.4

(1) Time when dew ending was visually observed, detected by sensor or simulated by the SWEB model.
(2) Wetness was caused by dew and rain.
(3) Wetness was caused by dew.
(4) Wetness was caused by rain.
ME: Mean error.
MEA: Mean absolute error.
-, No data or missing data.
+, No observation data.
A positive value indicates earlier detection of LW dry off by the SWEB model as compared with the observation/sensors.
A negative value indicates delayed detection of LW dry off by the SWEB model as compared with the observation/sensors.

Tableau II-3-7. Comparaison entre les données d'observation (Obs.), de mesure (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) et de simulation (Sim.) de la durée d'humectation. La durée d'humectation a été mesurée par trois capteurs et simulé par le modèle SWEB dans un couvert de blé d'hiver en 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon.
Comparison of observed, measured, and simulated canopy surface wetness duration (caused by rain or dew). The wetness was measured by three flat plate sensors (Sen-1, Sen-2 et Sen-3) and simulated by SWEB model for a wheat canopy, at the agrometeorological station of Arlon, Belgium, during May-July in 2006 and April-July 2007.

Year	Observation				Wetness source	Canopy Surface Wetness Duration (h)				
	Day start	Day end	Hour start	Hour end		Visual observation	Measured			Simulated
							Sen-1 [(a)]	Sen-2 [(a)]	Sen-3 [(a)]	SWEB [(b)]
2006	5/05/2006	6/05/2006	22:00	10:00	Rain	12.00	-	9.88	9.87	12.00
	11/05/2006	12/05/2006	22:15	9:30	Rain	11.25	10.05	8.18	-	10.00
	28/05/2006	29/05/2006	0:00	8:30	Rain	8.50	9.08	9.45	9.37	9.00
	29/05/2006	29/05/2006	10:10	13:30	Rain	3.33	-	-	-	4.00
	2/06/2006	3/06/2006	23:30	9:40	Dew	10.17	-	11.10	10.90	7.00
	4/06/2006	5/06/2006	0:15	9:00	Dew	8.75	9.32	9.23	-	8.00
	5/06/2006	6/06/2006	1:00	9:40	Dew	8.67	7.97	8.38	5.78	10.00
	6/06/2006	7/06/2006	0:30	8:15	Dew	7.75	6.10	8.47	-	7.00
	12/06/2006	13/06/2006	22:30	6:00	Dew	7.50	-	9.30	9.12	9.00
	16/06/2006	17/06/2006	23:00	8:30	Dew	9.50	9.88	10.25	9.58	7.00
	17/06/2006	18/06/2006	23:00	8:15	Dew	9.25	10.12	9.67	8.98	8.00
	22/06/2006	23/06/2006	23:15	8:30	Dew	9.25	8.87	8.97	8.83	8.00
	27/06/2006	28/06/2006	22:25	8:30	Dew	10.08	9.13	-	9.37	9.00
	30/06/2006	1/07/2006	22:30	8:30	Dew	10.00	9.37	9.18	9.95	8.00
	Mean					9.00	8.99	9.34	9.18	8.29
	ME						0.59	0.76	0.48	0.71
	MEA						1.18	1.68	1.75	1.29
	R^2						0.60	0.60	0.54	0.80
2007	20/04/2007	21/04/2007	0:00	8:15	Dew	8.3	-	6.83	7.28	-
	21/04/2007	22/04/2007	22:45	10:15	Dew	11.5	9.82	9.27	-	10.00
	22/04/2007	23/04/2007	21:45	10:30	Dew	12.3	11.45	11.03	11.32	10.00
	25/04/2007	26/04/2007	22:00	8:45	Dew	10.8	10.68	9.83	10.87	10.00
	26/04/2007	27/04/2007	21:45	8:45	Dew	11.0	-	-	-	10.00
	2/05/2007	3/05/2007	23:45	8:00	Dew	8.3	9.22	10.03	8.48	10.00
	12/05/2007	13/05/2007	21:45	10:00	Rain	12.3	-	-	-	10.00
	21/05/2007	22/05/2007	21:30	9:15	Rain	11.8	12.18	-	12.32	10.00
	22/05/2007	23/05/2007	22:30	8:30	Rain	10.0	12.42	-	12.05	10.00
	23/05/2007	24/05/2007	22:15	10:00	Rain	11.8	12.32	-	11.68	7.00
	24/05/2007	25/05/2007	21:45	9:00	Rain	11.3	13.12	-	-	8.00
	3/06/2007	4/06/2007	21:45	9:45	Dew	12.0	11.98	11.73	-	7.00
	12/06/2007	13/06/2007	22:30	9:30	Rain	11.0	12.22	12.23	11.92	7.00
	14/06/2007	15/06/2007	22:30	8:30	Rain	10.0	8.28	8.38	8.52	6.00
	21/06/2007	22/06/2007	21:45	11:45	Rain	14.0	14.50	12.63	12.20	8.00
	Mean					11.1	11.5	10.2	10.66	8.79
	ME						2.93	2.14	2.37	2.48
	MEA						3.09	2.37	2.71	2.73
	R^2						0.53	0.61	0.70	0.55

ME: mean error.
MEA: mean absolute error.
R^2 : was calculated from a linear regression.
(a) against the sensor detection.
(b) against the visual observations duration.
-, No data or missing data.

3.2.2. Analyse de l'occurrence des périodes d'humectation [valeurs 0/1]

La comparaison qualitative consiste à transformer les valeurs des heures d'humectation simulées (Sim.) en valeurs 0/1 (heure binaire) avec un seuil d'humectation de 0.2 h (c'est-à-dire 12 minutes ont été retenues comme durée d'humectation minimale pour qu'une heure soit considérée comme heure humide) et de les comparer aux données d'occurrence observées (Obs.) et mesurées (Mes.). Pour cette comparaison entre les données d'observation et de simulation (en terme de nombre d'heures humide et sèche), les résultats montrent que les

valeurs des indices statistiques POD, FAR, PNE sont respectivement de 0.69, 0.06 et 0.93 en 2006 et de 0.72, 0.10 et 0.79 en 2007 (Tableau II-3-8). On constate que le modèle a une légère tendance à sous-estimer le nombre d'heures total d'humectation, les valeurs de BIAS sont inférieures à 1 (0.74 en 2006 et 0.82 en 2007). Les résultats font apparaître également que les mêmes tendances ont été observées lorsqu'on compare les données des capteurs et les données de simulation (Tableau II-3-8). Les valeurs élevées de PNE démontrent la plus grande capacité du modèle à détecter l'occurrence d'événements secs (dry hour) plutôt qu'humides (wet hour) en comparant le nombre total d'heures humides et sèches simulées par le modèle. Ceci est dû au fait que le nombre d'heures sèches est toujours supérieur au nombre d'heures humides (considérant seulement la rosée et pas la pluie). Par conséquent, la détection de périodes sèches est beaucoup plus facile que la détection des heures humides (Dalla Marta et al., 2005c) ce qui conduit à des valeurs élevées de PNE. C'est pour cette raison qu'il est préférable de considérer trois scores POD, FAR et PNE pour avoir une meilleure analyse des résultats. La sous-estimation de la durée d'humectation par le modèle peut aussi être constatée par rapport aux valeurs mesurées.

Les heures de début et de fin d'humectation ainsi simulées par le modèle ont été aussi comparées aux données d'observation et aux mesures des capteurs. Les indices statistiques POD, FAR, PNE et BIAS ont été également calculés pour ces événements et sont présentés dans le tableau II-3-8 (Tableau II-3-8). Les résultats montrent une sous-estimation du modèle pour les deux types d'événements. La performance du modèle est beaucoup moins exaucée pour l'estimation d'occurrence de la fin que du début de l'humectation. Les faibles valeurs de POD sont dues au fait que le modèle signale la fin d'humectation avant qu'elle ne soit observée. Les faibles valeurs de PNE indiquent que le modèle simule mieux l'occurrence des heures humides que sèches. Mêmes constatations en comparant les données simulées aux données observées et nous ne constatons pas de différence significative entre l'observation et la mesure par rapport aux valeurs simulées.

Tableau II-3-8. Comparaison entre l'occurrence des périodes d'humectation observées (Obs.), simulées par le modèle SWEB (Sim.) et mesurées par trois capteurs (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) dans un couvert de blé d'hiver durant les saisons culturales 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon.
Comparison between leaf wetness occurrences visually observed (Obs.), simulated with SWEB (Sim.) and recorded by three sensors (Sen1, Sen2 and Sen3) for wet hour and dry hour events (start, ending and duration) during two cropping seasons 2006 and 2007.

Year		Obs. vs Sim.			Sim. vs Sen1			Sim. vs Sen2			Sim. vs Sen3		
		Start	Ending	Duration	Start	Ending	Duration	Start	Ending	Duration	Start	Ending	Duration
2006	POD	0.73	0.17	0.69	0.55	0.32	0.69	0.60	0.31	0.69	0.58	0.33	0.67
	FAR	0.20	0.17	0.06	0.09	0.14	0.04	0.17	0.13	0.04	0.28	0.07	0.07
	PNE	0.30	0.67	0.93	0.61	1.00	0.97	0.47	0.87	0.97	0.45	0.83	0.95
	BIAS	0.92	0.20	0.74	0.61	0.41	0.72	0.75	0.39	0.72	0.86	0.37	0.72
2007	POD	0.67	0.35	0.72	0.66	0.35	0.78	0.71	0.38	0.80	0.71	0.37	0.78
	FAR	0.04	0.09	0.10	0.20	0.18	0.06	0.21	0.13	0.05	0.27	0.09	0.05
	PNE	0.25	0.72	0.79	0.16	0.69	0.93	0.30	0.76	0.94	0.22	0.80	0.94
	BIAS	0.72	0.41	0.82	0.84	0.47	0.83	0.97	0.47	0.85	1.01	0.42	0.82

POD: Probability of detection; PNE : Probability of null event ; FAR: False alarm Ratio.

4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'analyse des résultats souligne les difficultés liées à la détermination de la durée d'humectation à la surface du couvert du blé d'hiver à l'aide de capteurs, du modèle ou par observation. Les observations de la durée d'humectation sont fastidieuses, laborieuses et difficiles à réaliser. Pour la mesure de la durée d'humectation, les capteurs ne sont pas toujours capables de fournir une indication précise de la présence ou de l'absence de l'humectation sur les feuilles. Le modèle SWEB semble mieux simuler le début que la fin de l'humectation ce qui conduit le plus souvent à une sous-estimation de la durée totale d'humectation au niveau du couvert. Les erreurs de sous-estimation sont généralement liées à la variabilité spatiale importante qui existe à l'intérieur du couvert (ceci a été bien réalisé dans le cadre de ce travail mais les résultats ne sont pas présentés ici). La durée d'humectation varie donc, non seulement en fonction des conditions météorologiques, mais aussi avec l'architecture et le stade de développement de la culture, de même qu'avec la position, l'angle, la forme des feuilles et leur mode d'insertion sur les tiges (Magarey et al., 2005b). Il est assez aisé d'obtenir des mesures représentatives au sommet du couvert, tandis que les difficultés existent à l'intérieur du couvert (Weiss et al., 1989).

La mesure du rayonnement net au dessus et dans le couvert n'a pas été prise en considération dans cette étude (comme prévu dans le modèle version originale, une seule valeur a été considérée pour l'ensemble du couvert) et pourrait être une source d'erreur. En effet, comme cela a été confirmé durant nos observations nocturnes, la condensation des feuilles inférieures du couvert se fait souvent après celles du haut ce qui crée un gradient d'humectation entre le

sommet et le bas du couvert. Une possibilité d'amélioration des résultats consisterait à déterminer le profil vertical du rayonnement net dans le couvert de blé.
Le choix d'un seuil d'humectation (pour considérer qu'une heure donnée est humide ou sèche) est très important. La sous-estimation et la sur-estimation dépendent généralement du choix du seuil d'humectation (Dalla Marta et al., 2005b). En ce qui concerne le pas de temps retenu il est de 1 heure et le seuil choisi pour l'analyse d'occurrence de l'humectation est de 12 minutes (Magarey et al., 2006b). Il est généralement conseillé, dans la littérature, d'utiliser un intervalle assez réduit (entre 10 et 30 min) afin de bien cerner la durée des périodes d'occurrence et d'interruption de l'humectation (Huber, 1992). Ce pas de temps est également fonction de l'agent pathogène à considérer.

L'un des problèmes de l'utilisation de l'approche de simulation de la durée d'humectation par le modèle SWEB est que le rayonnement net ne fait pas partie des mesures courantes effectuées par les stations des réseaux agrométéorologiques. Néanmoins, le rayonnement net peut être estimé à partir du rayonnement global souvent mesuré dans les stations météorologiques (Ortega-Farias et al., 2000). Si le rayonnement net n'est pas disponible, il pourrait être estimé à partir de la couverture nuageuse avec une incertitude de 5% (Madeira et al., 2002). Une autre limitation de cette approche est la disponibilité des données météorologiques d'entrée du modèle à côté des exploitations agricoles. L'utilisation de méthodes d'interpolation (surtout pour l'humidité relative et le rayonnement), les moyens de traitement informatiques et les outils de télédétection et plus particulièrement le radar météorologique (pour les précipitations) sont capables de fournir des informations pour améliorer sensiblement cette approche et la rendre ainsi opérationnelle. Avec ces méthodes une mesure de la durée d'humectation dans le temps et dans l'espace serait possible et permettrait d'automatiser des cartes de risque d'infection des parasites cryptogamiques du blé d'hiver.

Enfin en matière de conclusion, le modèle choisi dans cette étude a été évalué, pour déterminer la durée d'humectation sur les feuilles dans un couvert de blé d'hiver à partir des variables météorologiques et des propriétés du couvert végétal, sous des conditions de parcelles d'essai. L'analyse quantitative et qualitative des résultats de la simulation de la durée d'humectation par le modèle SWEB pour un couvert de blé d'hiver montre que le modèle simule beaucoup mieux les événements de début d'humectation que ceux de la fin d'humectation. Sur toute la période étudiée, le modèle a tendance à sous-estimer les périodes d'humectation. Le MAE durant les deux saisons culturales est en moyenne de 2,01 heures.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableaux :

Tableau II-3-1. Les paramètres par défaut et les paramètres modifiées du modèle SWEB pour le couvert de blé d'hiver 136
Tableau II-3-2. Situation géographique des stations météorologiques 139
Tableau II-3-3. Tableau de contingence 140
Tableau II-3-4. Nombre d'épisodes de début, fin et durée d'humectation foliaire mesurés par trois capteurs Campbell 237 (Sen-1, Sen-2 et Sen-3), simulés par le modèle SWEB (Sim.) et observés visuellement (Obs.) qui ont été utilisés pour la suite des analyses.. 144
Tableau II-3-5. Comparaison entre les données d'observation (Obs.), de mesure (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) et de simulation (Sim.) du début d'humectation (wetness onset) due à la rosée. Le début d'humectation a été mesuré par trois capteurs et simulé par le modèle SWEB dans un couvert de blé d'hiver en 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon. 146
Tableau II-3-6. Comparaison entre les données d'observation (Obs.), de mesure (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) et de simulation (Sim.) de la fin d'humectation (wetness dry-off). La fin d'humectation a été mesurée par trois capteurs et simulé par le modèle SWEB dans un couvert de blé d'hiver en 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon. 147
Tableau II-3-7. Comparaison entre les données d'observation (Obs.), de mesure (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) et de simulation (Sim.) de la durée d'humectation. La durée d'humectation a été mesurée par trois capteurs et simulé par le modèle SWEB dans un couvert de blé d'hiver en 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon. 149
Tableau II-3-8. Comparaison entre l'occurrence des périodes d'humectation observées (Obs.), simulées par le modèle SWEB (Sim.) et mesurées par trois capteurs (Sen-1, Sen-2 and Sen-3) dans un couvert de blé d'hiver durant les saisons culturales 2006 et 2007 à la station agrométéorologique d'Arlon. 151

Figures:

Figure II-3-1. Valeurs moyennes de LAI utilisées pour les paramètres d'entrée du modèle durant les saisons culturales 2006 et 2007 137
Figure II-3-2. Évolution de la durée d'humectation à la surface du couvert (SWD) à différentes valeurs de W_{max} (a), C_1 (b), LAI (c) et Z_c (d) pour des valeurs standard de R_n, U, T_a et RH 141
Figure II-3-3. Analyse de sensibilité de la durée d'humectation simulée aux variations de température *(T °C)*, d'humidité relative *(HR %)*, de vitesse du vent *(U m/s)*, du rayonnement net *(R_n W/m²)* et de la pluie (*Rain mm*) pour l'année 2001 dans les stations météorologiques d'EVERLANGE, d'OBERCORN et de SCHIMPACH. Chaque variable a subi une variation systématique de ±10% autour de la valeur initiale. La différence entre les heures humides simulées par le modèle par défaut et les valeurs simulées par le modèle ajusté a été déterminée. La somme des valeurs absolues de ces différences a été calculée pour chaque mois, en considérant S_+ et S_- comme la sensibilité respective pour tout changement positif et négatif des variables. S_i représente la valeur moyenne de S_+ et S_-. 143
Figure II-3-4. Analyse de sensibilité de la durée d'humectation simulée aux variations de température *(T °C)*, d'humidité relative *(HR %)*, de vitesse du vent *(U m/s)*, du rayonnement net *(R_n W/m²)* et de la pluie (*Rain mm*) pour l'année 2000 et 2001 à la station météorologique d'EVERLANGE. Chaque variable a subi une variation systématique de ±10% autour de la valeur initiale. La différence entre les heures humides simulées par le modèle par défaut et les valeurs simulées par le modèle ajusté a été déterminée. La somme des valeurs absolues de ces différences a été calculée pour chaque mois, en considérant S_+ et S_- comme la sensibilité respective pour tout changement positif et négatif des variables. S_i représente la valeur moyenne de S_+ et S_-. 143

RÉFÉRENCES

Bass, B., Savdie, I., and Gillespie, T. J. (1991). Simulation of leaf wetness duration for field corn. *Agricultural and Forest Meteorology* **57**, 69-84.

Campbell, C. L., and Madden, L. V. (1990). Introduction to plant disease epidemiology. *Monitoring epidemics: environment. John Wiley, London*, 43-73.

Chtioui, Y., Franc, L. J., and Panigrahi, S. (1999). Moisture prediction from simple micrometeorological data. *Phytopathology* **88**, 668-672.

Dalla Marta, A., De Vincenzi, M., Dietrich, S., and Orlandini, S. (2005a). Neural network for the estimation of leaf wetness duration: application to a *Plasmopara viticola* infection forecasting. *Physics and Chemistry of the Earth* **30**, 91-96.

Dalla Marta, A., De Vincenzi, M., Dietrich, S., and Orlandini, S. (2005b). Neural network for the estimation of leaf wetness duration: application to a *Plasmopara viticola* infection forecasting. *Physics and Chemistry of the Earth* **30,** , 91-96.

Dalla Marta, A., Magarey, R. D., and Orlandini, S. (2005c). Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 84-95.

Dalla Marta, A., Martinelli, L., and Orlandini, S. (2008). Leaf wetness spatial variability within grapevine canopy. *American Journal of Enology and Viticulture* **59**, 78-82.

Getz, R. R. (1991). Report on the measurement of leaf wetness. *WMO Publication, Geneva*.

Giesler, L. J., Horst, G. L., and Yuen, G. Y. (1996). A site-specific sensor for measuring leaf wetness duration within turfgrass canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* **81**, 145-156.

Gleason, M. L., Taylor, S. E., Loughin, T. M., and Koehler, K. J. (1994). Development and validation of an empirical-model to estimate the duration of dew periods. *Plant Disease* **78**, 1011-1016.

Huber, L. (1987). Modélisation spatio-temporelle de la durée d'humectation d'un couvert végétal après une pluie. Thèse de doctorat, I.N.A.P.G., Paris. France.

Huber, L. (1992). Déterminisme et mesure de la durée d'humectation en vue de la protection des plantes. *Agronomie* **12**, 281-295.

Jacobs, A. F. G., Heusinkveld, B. G., Kessel, G. J. T., and Holtslag, A. A. M. (2009). Sensitivity analysis of leaf wetness duration within a potato canopy. *Meteorological Applications* **16**, 523-532.

Kim, K. S., Taylor, S. E., Gleason, M. L., and Koehler, K. J. (2002). Model to enhance site-specific estimation of leaf wetness duration. *Plant Disease* **86**, 179-185.

Kim, K. S., Taylor, S. E., Gleason, M. L., Villalobos, R., and Arauz, L. F. (2005). Estimation of leaf wetness duration using empirical models in northwestern Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology* **129**, 53-67.

Lomas, J., and Shashoua, Y. (1970). The performance of three types of leaf wetness recorders. *Agric. Meteorol.* **7**, 159-166.

Luo, W., and Goudriaan, J. (2000). Dew formation on rice under varying durations of nocturnal radiative loss. *Agricultural and Forest Meteorology* **104**, 303-313.

Mackels, M. (2008). Modélisation des pertes de rendement des cultures de blé d'hiver au G-D de Luxembourg sur base de l'étude des surfaces photosynthétiquement actives. *Thèse de Doctorat, Université de Liège*.

Madeira, A. C., Kim, K. S., Taylor, S. E., and Gleason, M. L. (2002). A simple cloud-based energy balance model to estimate dew. *Agricultural and Forest Meteorology* **111**, 53-63.

Magarey, R. (1999). First Australasian Soilborne Disease Symposium - Gold Coast, Queensland, 10-12 February 1999. *Australasian Plant Pathology* **28**, 1-1.

Magarey, R. D., Russo, J. M., and Seem, R. C. (2006a). Simulation of surface wetness with a water budget and energy balance approach. *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 373-381.

Magarey, R. D., Russo, J. M., Seem, R. C., and Gadoury, D. M. (2005a). Surface wetness duration under controlled environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **128**, 111-122.

Magarey, R. D., Seem, R. C., and Russo, J. M. (2006b). Grape canopy surface wetness: Simulation versus visualization and measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 361-372.

Magarey, R. D., Weiss, A., Gillespie, T. J., Huber, L., and Seem, R. C. (2005b). Estimating surface wetness on plants. In: Hatfield, J.L., Baker, J.M., Viney, M.K. (Eds.), Micrometeorological measurements in Agricultural systems. *American Society of Agronomy, Madison, WI*.

Ortega-Farias, S., Antonioletti, R., and Olioso, A. (2000). Net radiation model evaluation at an hourly time step for Mediterranean conditions *Agronomie* **20**, 157-164.

Papastamati, K., McCartney, H. A., and van den Bosch, F. (2004). Modelling leaf wetness duration during the rosette stage of oilseed

rape. *Agricultural and Forest Meteorology* **123**, 69-78.

Pedro, M. J. (1980). Relation of leaf surface wetness duration to meteorological parameters. In: Sentelhas PC, Gillespie TJ, Gleason ML, Monteiro JEBA, Helland ST (2004b) Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 59-72.

Rao, P. S., Gillespie, T. J., and Schaafsma, A. W. (1998). Estimating wetness duration on maize ears from meteorological observations. *Canadian Journal of Soil Science* **78**, 149-154.

Santos, E. A., Sentelhas, P. C., Pezzopane, J. E. M., Angelocci, L. R., and Monteiro, J. (2008). Spatial variability of leaf wetness duration in cotton, coffee and banana crop canopies. *Scientia Agricola* **65**, 18-25.

Scherm, H., and van Bruggen, A. H. C. (1993). Sensitivity of simulated dew duration to meteorological variations in different climatic regions of californian. *Agricultural and Forest Meteorology* **66**, 229-245.

Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Batzer, J. C., Gleason, M. L., Monteiro, J., Pezzopane, J. R. M., and Pedro, M. J. (2005). Spatial variability of leaf wetness duration in different crop canopies. *International Journal of Biometeorology* **49**, 363-370.

Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Gleason, M. L., Monteiro, J., and Helland, S. T. (2004). Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 59-72.

Weiss, A., and Lukens, D. L. (1981). Electronic circuit for detecting leaf wetness and comparison of two sensors. *Plant Disease* **65** 41-43.

Weiss, A., Lukens, D. L., Norman, J. M., and Steadman, J. R. (1989). Leaf wetness in dry beans under semi-arid conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **48** 149-162.

PARTIE 2

Chapitre 4

Évaluation du modèle SWEB pour le contrôle des périodes d'infection de *Septoria tritici*

RÉSUMÉ

Les périodes d'humectation des feuilles constituent des données d'entrées essentielles pour les systèmes de prévision des risques épidémiques. Au G-D de Luxembourg, un système d'avertissement basé sur l'expertise agrométéorologique a été mis en place pour évaluer le développement de la septoriose à l'échelle du territoire. Pour améliorer la pertinence et les capacités de prédiction de ce système d'avertissement, l'impact des périodes d'humectation sur le développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles a été évalué. Cette étude a été faite dans le cadre de la simulation des conditions favorables à l'infection des feuilles de blé par la septoriose notamment la forme téléomorphe, M. graminicola.

Durant deux saisons culturales, 2006 et 2007, des données de simulation de la durée d'humectation simulée par SWEB et des périodes d'infection de S. tritici simulées par PROCULTURE ont été analysées et comparées statistiquement aux observations journalières du développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles de différentes variétés de blé d'hiver. L'analyse des résultats a été faite dans le but d'établir l'impact des périodes d'humectation sur la qualité des simulations du modèle de prévision épidémique. La comparaison qualitative des données de simulation des périodes d'infection et des données d'observation montre que les résultats seront nettement meilleurs si les données des deux modèles, PROCULTURE et SWEB, sont utilisées ensemble. En conclusion, une valeur approximative de 11 h d'humectation a été définie comme étant un seuil minimal pour permettre l'infection des feuilles de blé par la septoriose.

Mots clés : *SWEB, PROCULTURE, Septoriose, Culture du blé d'hiver.*

1. INTRODUCTION

La disponibilité et l'analyse des données agrométéorologiques sont d'une importance primordiale pour la protection des cultures. Les infections des parasites cryptogamiques et les variables agrométéorologiques sont souvent reliées par des modèles de simulation qui fournissent des informations utiles pour définir le moment optimum de traitement fongicide. La durée d'humectation est une variable agrométéorologique fortement liée au déclenchement et développement des infections. En effet, la plupart des agents pathogènes exigent un film d'eau à la surface des plantes pour déclencher le processus d'infection (Ciancio et Mukerji, 2007; Forrest et Nutter, 2007; Huber et Gillespie, 1992; Lhomme et Jimenez, 1992; Magarey et Sutton, 2007; Papastamati et al., 2004).
L'humectation des feuilles due à la pluie et/ou à la rosée est l'un des facteurs les plus importants pour le contrôle des principaux champignons pathogènes. Elle conditionne l'infection de l'hôte par les spores.

Au G-D de Luxembourg et dans d'autres régions à climat océanique, la septoriose est la principale maladie cryptogamique affectant le blé d'hiver (Brown et al., 2001; El Jarroudi et al., 2009; El Jarroudi et al., 2002). Cette maladie causée par l'agent *Septoria tritici* (téléomorphe *Mycosphaerella graminicola*) peut provoquer une perte significative du rendement du blé (Eyal et al., 1985; King et al., 1983; Royle et al., 1993; Royle et al., 1986; Shaw et Royle, 1989). Au G-D de Luxembourg, lorsque les conditions météorologiques sont favorables et qu'aucune protection n'est mise en place, cette maladie pourrait endommager la récolte et causer des pertes significatives du rendement allant de 20 à 30% (pour les années à forte septoriose) si les trois dernières feuilles sont sévèrement attaquées (El Jarroudi, 2005; El Jarroudi et al., 2009).

Au G-D de Luxembourg, depuis 2004, des bulletins d'avertissements des principales maladies fongiques du blé d'hiver (septoriose, rouille brune, fusariose et oïdium) ont été publiés sur la page Web de la Chambre d'Agriculture Luxembourgeoise et dans le journal agricole luxembourgeois "De Letzeburger Bauer". Ces bulletins donnent hebdomadairement l'état d'avancement de la maladie et conseillent les agriculteurs quant au moment adéquat de traitement fongicide sur leur culture. Les avis diffusés via ces bulletins sont basés sur des observations au champ et sur le logiciel PROCULTURE. Ces bulletins sont continuellement améliorés grâce aux différentes recherches qui approfondissent la relation parasite-hôte-climat. C'est dans ce contexte que notre travail s'insère et a pour objectif principal de

participer à cette amélioration et de rendre plus opérationnelles la diffusion des bulletins d'avertissement et la collecte des données scientifiques sur l'épidémiologie des maladies cryptogamiques du blé d'hiver. En effet, l'actuel système d'avertissement grand-ducal utilise des modèles qui se basent sur les règles faisant appel à un seuil d'humidité relative, généralement supérieur à 85 ou 90%. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact de la simulation des périodes d'humectation sur le développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles du blé d'hiver. En outre, si les résultats étaient intéressants, la présente approche pourrait être testée sur d'autres maladies car il semble que le paramètre "durée d'humectation" est également déterminant pour la simulation d'autres maladies foliaires comme les rouilles, l'oïdium et l'helminthosporiose.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'objectif de ce chapitre est de voir si l'on peut améliorer les performances de PROCULTURE, si on lui injecte des durées d'humectation simulées par le modèle physique SWEB en lieu et place du système empirique actuel basé sur des niveaux d'humidité relative. Les données d'observation et de suivi du développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles ont été utilisées comme données de référence pour évaluer la pertinence de cette nouvelle approche.

2.1. Choix du site d'essai, du protocole expérimental et de la méthodologie de mesure

Les expérimentations ont été réalisées dans des parcelles d'essai à la station agrométéorologique de l'Université de Liège, Campus d'Arlon. La description et les caractéristiques du site d'essai et le protocole expérimental ont été détaillés dans le chapitre II de cette deuxième partie (cf. 2 - Partie II-Chapitre 2). Les essais ont été suivis pendant deux années successives, 2006 et 2007, ce qui constitue une base de données intéressante pour l'analyse des données. Le même protocole expérimental a été mis en place pendant ces deux années de mesures. Pour le suivi du développement de la septoriose et de la détermination des périodes d'humectation, 4 variétés de blé d'hiver ont été mises en essai (Flair, Achat, Urban, Akteur) durant ces deux campagnes de mesure (Tableau II-4-1). Le suivi du niveau de maladie sur les trois dernières feuilles a duré du mois d'avril au mois de juillet dans les sites d'essai à une fréquence de trois fois par semaine en 2006 et journalière en 2007. Les parcelles d'essai ont été semées au mois d'octobre (Tableau II-4-1). Pour le suivi de la phénologie et du

niveau de la maladie, 30 feuilles par parcelle ont été aléatoirement sélectionnées et marquées. Les stades phénologiques de la culture selon le code binaire de Zadoks (Zadoks et al., 1974) ont été déterminés. Les principaux stades phénologiques mesurés sont mentionnés dans les annexes (Annexe H-Partie II).

Tableau II-4-1. Description des caractéristiques du site d'essai.
Field site characteristics.

Weather Stations	Field Sites	Latitude (DMS)	Longitude (DMS)	Altitude (m)	Year	Cultivar	Sowing Date	Previous crop	Date of flag leaf emergence	Start of observation	End of observation
ARLON-STATION	Arlon Station	49° 40' 55N	5° 49' 27E	406	2006	Flair	14/10/2005	grass	1/06/2006	29/05/2006	10/07/2006
						Achat	14/10/2005		5/06/2006	29/05/2006	16/07/2006
						Urban	14/10/2005		8/06/2006	29/05/2006	16/07/2006
						Akteur	14/10/2005		5/06/2006	29/05/2006	16/07/2006
					2007	Akteur	14/10/2006		21/05/2007	27/04/2007	25/07/2007

2.2. Le modèle de simulation des périodes d'infection de *S. tritici* PROCULTURE

Le modèle PROCULTURE a été développé par l'Unité de Phytopathologie de l'Université Catholique de Louvain à Louvain-la-Neuve (Moreau et Maraite, 1999). Il constitue une base intéressante pour la gestion de la culture du blé d'hiver au G-D du Luxembourg. Le modèle évalue, en fonction des conditions météorologiques horaires, simultanément le développement des 5 dernières feuilles (F5 à F1, F1 étant la dernière feuille formée) et le moment d'infection de ces feuilles. En plus des données météorologiques horaires, la date de semis et le stade phénologique sont indispensables pour le fonctionnement du modèle. Le modèle de simulation prévoit les infections primaires et secondaires exprimées et permet de prévoir aussi les latences futures sur les cinq dernières feuilles ainsi que le pourcentage de la surface malade qui sera atteint.

La validation du modèle PROCULTURE a été réalisée au Sud de la Belgique sur une période de 4 ans (Moreau et Maraite, 1999) et au G-D de Luxembourg durant 5 ans (El Jarroudi, 2005; El Jarroudi et al., 2009). Les données d'entrées du modèle sont les données météorologiques horaires (pluie, humidité relative et température) ; les conditions initiales de la simulation sont exprimées par :

- la date de semis ;
- le stade phénologique de la variété semée en début de simulation ;
- le pourcentage de dégagement de la dernière feuille observé sur le terrain en début de simulation ;
- le pourcentage de la septoriose observé en début de simulation.

Les données de sortie du modèle sont :

- le pourcentage de formation des cinq dernières feuilles et le moment d'apparition des symptômes sur ces feuilles ;
- le degré de sévérité de la maladie sur les cinq dernières feuilles.

Les conditions d'infection des feuilles de blé par *S. tritici* sont *:*
Une pluie ≥ 0,1 mm pendant la première heure pour préparer les pycnides et une pluie ≥ 0,5 mm pendant la deuxième heure pour éclabousser ces pycnides ; une humidité relative > 60 % sans interruption pendant les 19 heures suivantes ; une température > 4°C sans interruption pendant les 48 heures suivantes (Calay et al., 2002; Moreau et Maraite, 1999, 2000).

2.3. Le modèle de la simulation de la durée d'humectation SWEB

Le modèle SWEB (Surface Wetness Energy Balance) a été développé à l'université de Cornell (Cornell University) aux Etats-Unis. Le modèle est basé sur le concept de simulation de la durée d'humectation à l'échelle du couvert (Magarey, 1999; Magarey et al., 2005). SWEB est un modèle physique basé sur le bilan énergétique et le bilan hydrique. Le modèle simule la durée d'humectation superficielle des feuilles. Les variables d'entrées du modèle sont : *(i)* la température de l'air (°C), *(ii)* l'humidité relative (%), *(iii)* la pluie (mm), *(iv)* la vitesse du vent (m s^{-1}) et *(v)* le rayonnement net au-dessus et dans le couvert (W m^{-2}). La sortie du modèle est constituée par le pourcentage de la surface foliaire mouillée et une durée d'humectation de la surface foliaire représentée par des 0 ou 1 (0 = pas d'humectation, 1 = présence d'humectation) à chaque pas de temps simulé.

Le modèle SWEB a été calibré et testé sur un jeu de données composé de quatre variétés de grappes de vignes à Geneva, New York (Magarey, 1999) puis a été validé dans un champ viticole aux Etats-Unis sur les variétés "Chardonnay" et "Concord" et sur la variété "Cabernet franc" en Australie (Magarey, 1999; Magarey et al., 2006). Le modèle se compose de quatre sous-modules (cf. 3.3 Chapitre 1-Partie II).

Dans le présent travail, le modèle de simulation SWEB conçu pour la culture de vigne a été ajusté et adapté pour la simulation de la durée d'humectation sur la culture de blé.

2.4. Les données météorologiques

La méthodologie adoptée dans notre travail est d'abord issue d'études bibliographiques en lien avec notre sujet et élargies à d'autres régions, d'autres cultures et d'autres maladies

(Cicogna et al., 2005; Dalla Marta et al., 2007; Dalla Marta et al., 2005; Hoppmann et Wittich, 1997). Des données météorologiques horaires d'humidité relative, de pluie, de température et de rayonnement ont été récoltées à la station agrométéorologique d'Arlon pour la simulation de la durée d'humectation. Les techniques de mesures microclimatiques sont détaillées dans le chapitre 2 de cette deuxième partie (cf. 2. de Partie 2-Chapitre 2). Les données ont subi un contrôle de qualité.

2.5. Analyse statistique

Une fois les données phénologiques et phytopathologiques récoltées, les données agrométéorologiques horaires sont insérées dans la base de données PROCULTURE et la simulation de la septoriose est réalisée via la page Web de ce logiciel (http://www.fymy.ucl.ac.be/proculture/). Les données agrométéorologiques horaires sont également utilisées pour alimenter le modèle SWEB. Les données de sortie du modèle PROCULTURE ont été comparées ensuite aux données d'observation de la maladie. A partir des périodes d'infection simulées par le modèle PROCULTURE, on a extrait des périodes d'humectation qui ont été comparées avec celles déterminées par le modèle SWEB. Des tableaux de contingence ont été utilisés pour analyser les résultats. Des indices statistiques POD, FAR, CSI et Bias ont été calculés.

3. RÉSULTATS

Le modèle de détermination de la durée d'humectation SWEB a été évalué dans le chapitre précédent (Partie II-Chapitre 3) par comparaison des données observées et mesurées avec des données simulées par SWEB. Les données de simulation du modèle ont été utilisées dans ce chapitre pour évaluer les relations entre les périodes d'humectation simulées et le développement de la septoriose dans les parcelles d'essai du blé d'hiver. Les estimations visuelles des symptômes de la maladie sur les trois dernières feuilles ont servi de références pour la comparaison aux données simulées par le modèle SWEB et le modèle prévisionnel PROCULTURE afin d'obtenir une relation entre les périodes d'humectation et le développement de la septoriose.

3.1. Comparaison entre les données de simulation de PROCULTURE et l'estimation visuelle de développement de *S. tritici*.

Le tableau suivant (Tableau II-4-2) donne les résultats de l'analyse de la comparaison statistique des données d'observation et de simulation par PROCULTURE des occurrences d'infection de la septoriose durant les deux saisons culturales 2006 et 2007 dans des parcelles d'essai sur le site d'Arlon. Cette comparaison a été faite dans le but d'étudier l'aptitude du modèle à simuler les périodes d'infection de *S. tritici* en utilisant les données de précipitations, d'humidité relative et de température. Les résultats de cette comparaison vont servir par la suite à évaluer les périodes d'humectation simulées par SWEB et leurs concordances avec l'apparition des symptômes de *S. tritici* sur les trois dernières feuilles.

Tableau II-4-2. Comparaison statistique des données d'observation et de simulation des occurrences d'infection de la septoriose durant les deux saisons culturales 2006 et 2007 dans des parcelles d'essai sur le site d'Arlon. Cette comparaison est basée sur les tableaux de contingence. Le pourcentage de l'estimation visuelle de développement de la maladie correspond à une valeur moyenne de 120 plantes dans 4 parcelles choisies de façon aléatoire (30 plantes/parcelle).
Statistical comparison between visual observation and PROCULTURE simulation of leaf blotch occurrence at Arlon site during the period April to June for two cropping seasons (2006 and 2007). The validation was based on standard verification concept and the yes–no (event-non event) simulation-observation pairs (contingency table). Score indices POD, FAR, CSI and BIAS show the qualitative comparison between infection periods on the last three leaves (L1, L2 and L3). The visually estimated area (% of leaf area covered by S. tritici lesions) represents the mean value made on 120 plants randomly chosen in 4 plots (30 plants/plot).

Year		Observation/simulation			
		L3	L2	L1	All
2006	POD	0.92	0.92	1	0.94
	FAR	0.08	0.00	0.05	0.04
	CSI	0.84	0.92	0.95	0.90
	BIAS	1	0.92	1.05	0.99
	N	23	23	23	23
2007	POD	0.90	0.90	1	0.93
	FAR	0.17	0.17	0.13	0.16
	CSI	0.77	0.77	0.86	0.80
	BIAS	1.09	1.09	1.15	1.11
	N	20	20	20	20

POD: Probability Of Detection. Its range is 0 to 1. Perfect forecast = 1.
FAR: False Alarm Ratio. Perfect value = 0.
CSI: Critical Success Index, it takes into account both false alarms and missed events. Its range is 0 to 1, Perfect value = 1.
BIAS = (number of yes simulated/number of yes observation) and it is a measure of over or under estimation.
N: number of occurrence events analyzed for comparing the visual estimate area (% of leaf area covered by sporulating *S. tritici* lesions observed in plots) against the output septoria risk simulation model (PROCULTURE) from April to June during two cropping seasons (2006 to 2007).

Les résultats montrent que, durant les deux saisons culturales, les valeurs de BIAS sont proches de 1 (Tableau II-4-2) c'est-à-dire que le modèle n'a ni sous-estimé, ni sur-estimé le nombre d'infections. Les résultats font apparaître également que, sur 23 événements analysés en 2006 et 20 événements en 2007, les valeurs de CSI sont respectivement de 90% et de 80% (Tableau II-4-2). Ces valeurs sont dues en effet à des infections observées (ou pas observées) sur le terrain alors qu'elles ne sont pas détectées (ou détectées) par le modèle. Les simulations de PROCULTURE ont clairement révélé des différences importantes entre les étages foliaires et entre l'année 2006 et 2007. En 2007, par exemple, les premiers symptômes d'infection sur F1 ont été observés le 21 mai. À cette date le modèle n'a pas prédit correctement l'infection (Figure II-4-2). Normalement, on s'attendait à observer la maladie sur le site d'Arlon seulement sur F3 et de rares F2. Dans les faits, la maladie a été observée sur les trois étages supérieurs. Les études faites dans la littérature indiquent clairement que la contamination de F3 par l'effet "splash" ne peut se faire que par les conidies issues de la feuille F4 et dans une moindre mesure par celles de la feuille F5 (Moreau et Maraite, 1999; Shaw et Royle, 1993). La contamination de F2 ne peut se faire que via les lésions présentes sur F3 et dans une moindre mesure par celles de F4. Enfin, la contamination de F1 ne peut se faire que par les lésions présentes sur F2 et dans une moindre mesure par celles de F3. Plusieurs questions se posent sur l'origine de ces lésions apparues sur F1, on observait la maladie seulement sur F1 et aucun symptôme sur F2. D'après une communication personnelle avec le professeur Maraite (UCL), à partir de 2004 et pendant les années 2005 et 2006, on a commencé à observer des infections par ascospores disséminées par le vent en pleine saison. Les ascospores pourraient donc infecter les feuilles par le haut et le bas.

Le nombre d'infections manquées par le modèle est plus important en 2007 qu'en 2006 et la variation de l'erreur est importante entre les étages foliaires.

Les figures II-4-1 et II-4-2 montrent l'impact des périodes d'humectation simulées par le modèle SWEB sur le développement de la septoriose observée et simulée sur les trois dernières feuilles au niveau du site d'Arlon durant deux saisons culturales 2006 et 2007. Les résultats de la simulation des périodes d'infection par le modèle PROCULTURE sont présentés dans la figure II-4-1(d) et la figure II-4-2(d).

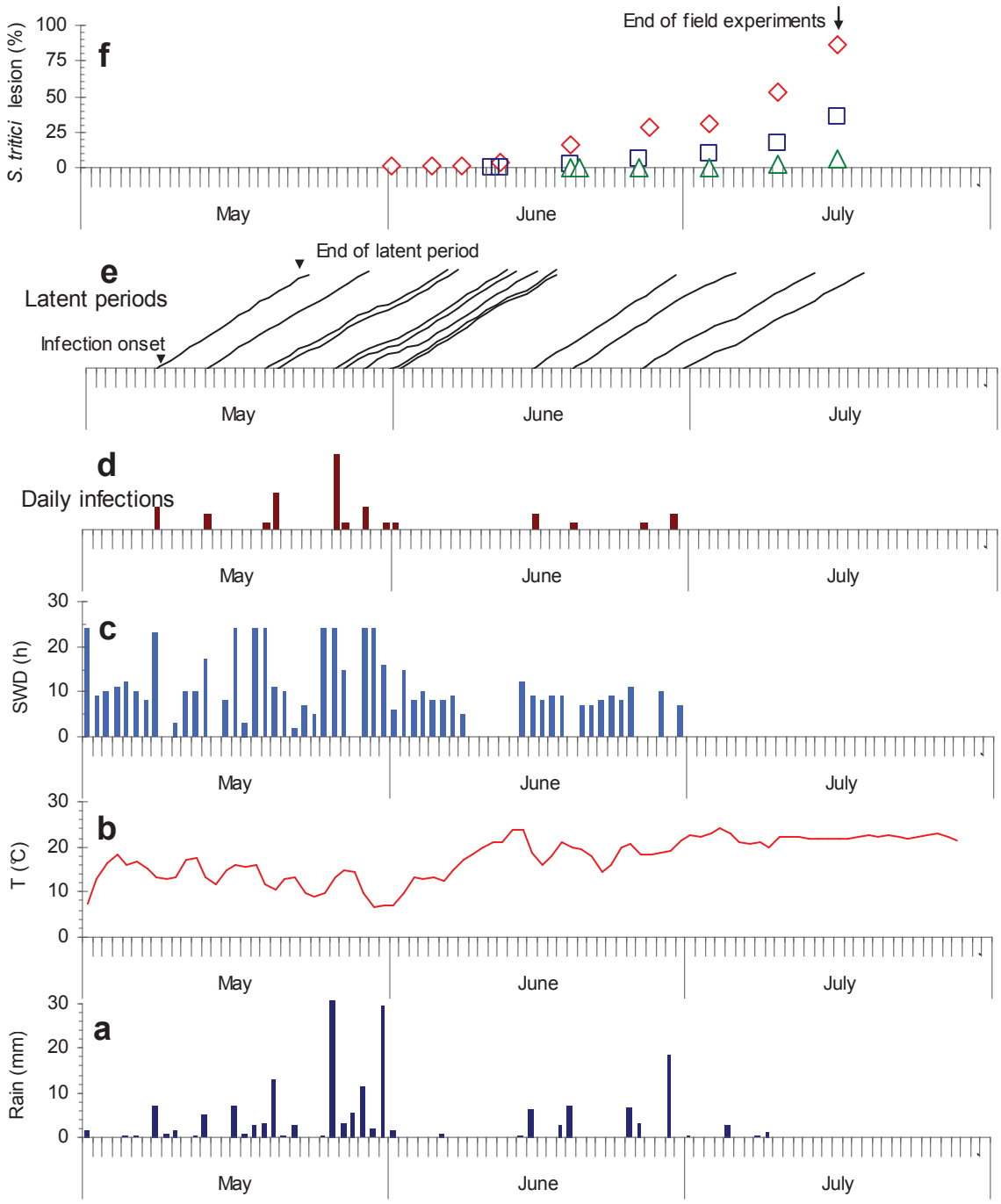


Figure II-4-1. Comparaison entre les données d'observation et de simulation du développement *S. tritici* et les périodes d'humectation simulées par le modèle SWEB sur les trois dernières feuilles au niveau du site d'Arlon durant la saison culturale 2006.

Comparison among observed and simulated S. tritici disease progress by PROCULTURE with simulated surface wetness duration (SWD) in 2006 at Arlon site.

a : rain gauge precipitation (mm). b : daily values of mean temperature (°C).

c : surface wetness duration (SWD) periods simulated by the SWEB model. The driving variables of the model are the following hourly agrometeorological parameters: temperature (°C), relative humidity (%), net radiation (W m^{-2}). The hourly outputs of the model is: surface wetness (0 = no, 1 = yes).

d : number of hours per day of high probability of infection simulated by PROCULTURE

e : latent period of *S. tritici*. The latent period of the disease calculated by polynomial equation of Shaw (Shaw, 1990). The end of the latent period determines the starting point of the simulated *S. tritici* symptom expression.

f : Visually estimated leaf area (%) covered by sporulating *S. tritici* lesions observed in fields (at Arlon site) on leaves L3 (◊), L2(□) and L1(Δ) (flag leaf). It represents the mean value made on 120 plants randomly chosen in 4 plots (30 plants/plot).

Les figures II-4-1(e) et II-4-2(e) montrent les périodes de latence calculées par l'équation polynomiale développée par Shaw (Shaw, 1990)[1] à partir des données de température. Les figures II-4-1(f) et II-4-2(f) montrent l'estimation visuelle du pourcentage de développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles (L1, L2 et L3).

En 2006, les symptômes observés par exemple le premier juin sur F3 (Figure II-4-1(f)) qui correspondent à des périodes d'infection du 15 mai n'ont pas été correctement simulés par le modèle PROCULTURE. De même en 2007, les premiers symptômes qui ont été observés le 21 mai sur F1 (ce qui correspond à la période d'infection du 3 mai calculée par l'équation polynomiale de Shaw) n'ont pas été correctement prédits par PROCULTURE (Figure II-4-2(f)).

Afin d'obtenir une relation entre les périodes d'infection qui n'étaient pas simulées avec succès par PROCULTURE et l'humectation des feuilles (Tableau II-4-2), nous avons analysé les données de simulation des périodes d'humectation. Pour ce faire nous avons comparé le moment d'apparition des symptômes de la maladie observés sur les trois dernières feuilles dans des parcelles d'essai et les périodes d'humectation simulées par le modèle SWEB. Les figures II-4-1(c) et II-4-2(c) montrent les périodes d'humectation simulées par SWEB. La durée moyenne des périodes d'humectation simulée par le modèle est de 12,8 heures en 2006 et de 12,6 heures en 2007 (Figure II-4-1(c) et II-4-2(c)). L'analyse des résultats de la figure II-4-1(c) a montré que le modèle, par exemple, a bien simulé des périodes d'humectation du 15 mai (9h) et la source de l'humectation de cette période est due à un dépôt de rosée.

[1] Suite à chaque infection, de nouvelles pycnides apparaissent après une période de latence calculée par l'équation polynomiale développée par Shaw et qui dépendent de la température. Pour chaque infection le programme calcule 1/p (p = latence) en fonction de la température moyenne journalière. Ensuite, le programme PROCULTURE cumule 1/P jusqu'à ce que la somme cumulée atteigne 100 %, ce qui correspond à la première apparition de nouvelles pycnides.

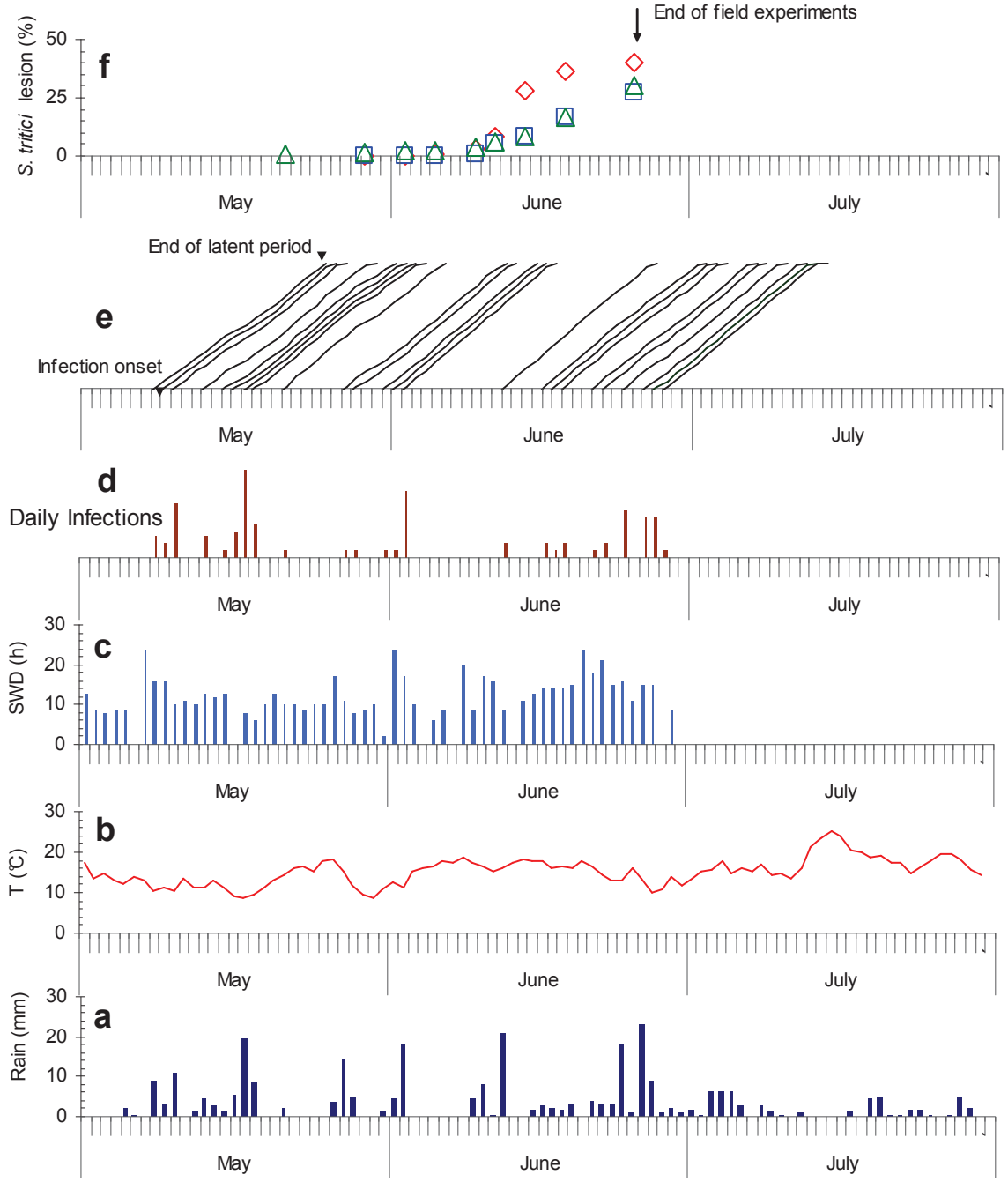


Figure II-4-2. Comparaison entre les données d'observation et de simulation du développement *S. tritici* et les périodes d'humectation simulées par le modèle SWEB sur les trois dernières feuilles au niveau du site d'Arlon durant la saison culturale 2007.
Comparison among observed and simulated S. tritici disease progress by PROCULTURE with simulated surface wetness duration (SWD) in 2007 at Arlon site.
a : rain gauge precipitation (mm). b : daily values of mean temperature (°C).
c : surface wetness duration (SWD) periods simulated by the SWEB model. The driving variables of the model are the following hourly agrometeorological parameters: temperature (°C), relative humidity (%), net radiation (W m-²). The hourly outputs of the model is: surface wetness (0 = no, 1 = yes).
d : number of hours per day of high probability of infection simulated by PROCULTURE
e : latent period of *S. tritici*. The latent period of the disease calculated by polynomial equation of Shaw (Shaw, 1990). The end of the latent period determines the starting point of the simulated *S. tritici* symptom expression.
f : Visually estimated leaf area (%) covered by sporulating *S. tritici* lesions observed in fields (at Arlon site) on leaves L3 (◊), L2(□) and L1(Δ) (flag leaf). It represents the mean value made on 120 plants randomly chosen in 4 plots (30 plants/plot).

3.2. Relation entre les périodes d'humectation simulées par SWEB et les infections de *S. tritici* simulées par PROCULTURE

Il s'agit d'établir une relation entre les périodes d'humectation et le développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles du blé d'hiver. En d'autres termes, il va falloir déterminer les conditions minimales de durée d'humectation favorables à une infection. Pour ce faire, nous avons procédé à une analyse statistique de la distribution des périodes d'humectation en fonction de l'infection des feuilles par la septoriose. Les périodes d'humectation et l'infection journalière à analyser sont simulées respectivement par les modèles SWEB et PROCULTURE préalablement évalués par des données d'observation (Partie II-Chapitre 3 pour SWEB et Tableau II-4-2 pour PROCULTURE).

La distribution des périodes d'humectation en fonction de l'infection journalière des trois dernières feuilles attaquées par *S. tritici* durant les saisons culturales 2006 et 2007 est présentée dans la figure suivante.

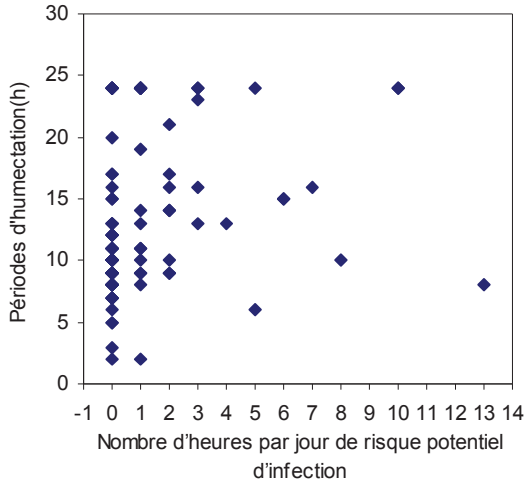


Figure II-4-3. Relation entre les périodes d'humectation simulées par SWEB et le risque d'infection journalière des trois dernières feuilles attaquées par *S. tritici* simulé par PROCULTURE durant les saisons culturales 2006 et 2007.
Relationship between the surface wetness period determined by SWEB and the number of hours per day of high probability of infection assessed by PROCULTURE.

La représentation graphique de ces données en utilisant l'approche statistique des "boites à moustaches" (Box & Whiskers Plot) montre que les périodes d'humectation se répartissent en différentes classes selon le risque potentiel d'infection (Figure. II-4-4). On distingue 5 classes : 0, 1, 2, 3 et 5 qui sont représentées par des rectangles situés sur l'axe vertical. Chaque groupe est caractérisé par la médiane qui est représentée par un trait à l'intérieur du rectangle. Les résultats font apparaître également que pour une durée d'humectation de 10 h (la médiane) on n'a pas d'infection (groupe d'infection 0), alors que celle-ci peut se manifester à partir d'une valeur supérieure à 10 h (la valeur médiane).

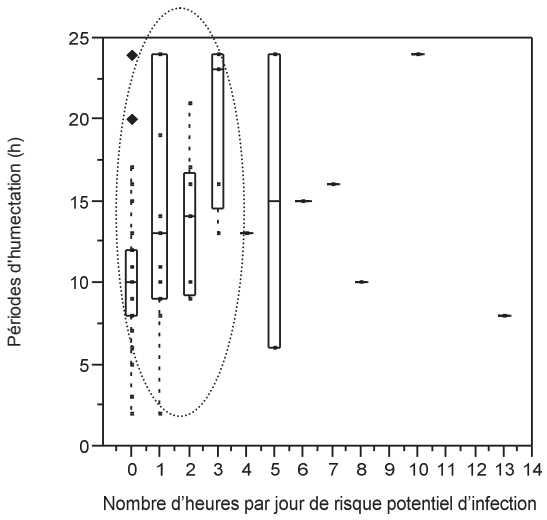


Figure II-4-4. Représentation graphique de la distribution des périodes d'humectation en fonction de l'infection journalière des feuilles de blé par *S. tritici.* Le graphe représente les "boites à moustache" par groupe d'infections journalières (groupe 0, 1, 2, 3 et 5). La médiane de chaque groupe est représentée par le trait à l'intérieur de la boite. Les points (♦) représentent les valeurs atypiques (outliers).
Relationship between the surface wetness period determined by SWEB and the number of hours per day of high probability of infection simulated by PROCULTURE. The bars indicate the Box and Whiskers Plot.

Pour vérifier ceci, nous avons poussé l'analyse des données en utilisant les tableaux de contingence. Pour l'évaluation des performances du modèle à déterminer le seuil minimal d'infection pour la septoriose, les valeurs des périodes d'humectation ont été divisées en deux catégories en utilisant différents seuils de durée d'humectation (Figure II-4-5). Les périodes d'infection simulées par PROCULTURE ont été également divisées en deux catégories : absence [0] ou présence [1] d'infection. Par la combinaison des deux seuils, des tableaux de contingence ont été construits (Tableau II.4.3). L'évaluation de la performance du modèle SWEB a été faite en se basant sur trois scores calculés à partir des tableaux de contingence : probabilité de détection POD, pourcentage correct (PC) et probabilité de fausse détection (POFD). L'évolution des trois indices en fonction de différents seuils de durée d'humectation simulée par SWEB est présentée dans la figure suivante. Les valeurs des trois scores montrent une très forte sensibilité au seuil d'humectation. Après l'analyse des résultats (Figure II-4-5), nous avons décidé de fixer un seuil à partir duquel les infections sont positives.

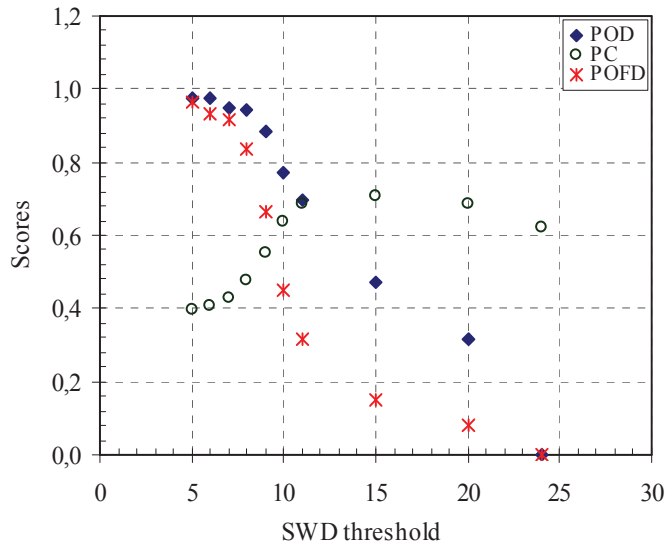


Figure II-4-5. Comparaison des scores POD, PC et POFD en fonction de différents seuils de durée d'humectation.
Comparison of different scores as a function of different thresholds of simulated surface wetness periods.

POD is the number of hits relative to the total number of events. POD = positive-infections / (positive-infections + false-negative. PC is number of correct predictions to the total number of event. PC = (positive-infections + negative-infections) / (total event). Perfect score = 1.
POFD is the ratio between the number of false predictions to the number of non events. POFD = false-negative / (false-negative + negative-infections). Perfect score = 0.

Les résultats permettent de constater qu'à partir d'un seuil proche de 11 h d'humectation un grand nombre d'infections sont prédites correctement par le modèle avec un certain nombre minimal d'erreurs de faux-négatif [2] et de faux-positif [3] (Tableau II-4-3). On constate également que les résultats sont meilleurs si les taux de faux-négatif et de faux-positif sont faibles. Ces taux dépendent tous les deux du seuil choisi, mais varient en sens inverse. En effet, si l'on fixe un seuil de durée d'humectation faible, le taux de détection augmentera (POD atteint une valeur plus élevée), avec l'inconvénient que le taux de faux-positif augmentera également (POFD atteint une valeur plus élevée). Inversement, si l'on fixe un seuil plus grand, le taux de faux-positif baissera puisque moins de cas normaux seront considérés comme positifs, mais avec l'inconvénient que le taux de détection baissera également.

Les résultats montrent que l'établissement de la relation entre la durée d'humectation et le déclenchement de l'infection n'est pas si simple à établir. Néanmoins, la première tentative de l'évaluation du modèle SWEB pour la détermination d'une durée d'humectation minimale qui pourrait déclencher l'infection est encourageante. Le tableau suivant donne les résultats des indices de contingence calculés au seuil de durée d'humectation de 11 h. Il montre que pour le seuil choisi, 25 infections-positives (seuil d'infection est supérieur à 0) et 39 infections-négatives (seuil d'infection est égal à 0) sont correctement simulées par le modèle. En

[2] Falsely predicted risk of minor or no infection
[3] Falsely predicted risk of major infection

revanche, 29 événements ont été incorrectement simulés par SWEB : 18 faux-positifs et 11 des faux-négatifs. Les valeurs de POD et de PC calculées pour le seuil de 11 h sont de l'ordre de 70%. Les résultats font apparaître qu'au seuil d'humectation 11 h subsistent certaines erreurs de faux négatif et de faux positif (PODF = 32%).

Tableau II-4-3. Résultats des indices de contingence calculés pour un seuil de période d'humectation de 11 h (93 épisodes simulés).
Contingency table of the 93 simulated relative to the S. tritici infection. Threshold for the surface wetness period was established to 11 hours.

		PROCULTURE[a]			**POD[g]**	**PC[h]**	**POFD[k]**
		= 0	> 0	Total			
SWEB[b]	< 11	39[c]	11[d]	50			
	> 11	18[e]	25[f]	43	0.69	0.69	0.32
	Total	57	36	93			

a : risk of infection occurrence simulated by PROCULTURE: 0 = absence of infection, 1 = presence of infection.

b: surface wetness periods simulated by SWEB model.

c: negative-infections.

d: false-negative.

e: false-positive.

f: positive-infections.

g: POD is the number of hits relative to the total number of events. POD = positive-infections / (positive-infections + false-negative).

h: PC is the number of correct predictions to the total number of event PC = (positive-infections + negative-infections) / (total event). Perfect score = 1.

k: POFD is the ratio between the number of false predictions to the number of non events POFD = false-negative / (false-negative + negative-infections). Perfect score = 0.

Différentes hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ces résultats. Ces hypothèses sont liées aux limites d'utilisation, d'une part du modèle Proculture et d'autre part du modèle SWEB. Ces limites sont largement discutées dans ce chapitre et le chapitre précédent.

En conclusion, d'après ces deux approches statistiques, on peut dire qu'une valeur approximative de 11 h d'humectation peut être définie comme étant un seuil minimal pour permettre l'infection des feuilles de blé par la septoriose.

4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'objectif fixé au début de ce chapitre est d'analyser les périodes d'humectation en relation avec les risques épidémiologiques en particulier ceux causés par *S. tritici*. Nous avons essayé

ainsi de trouver une relation entre les périodes d'humectation et le développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles du blé d'hiver.

Comme mentionné ci-dessus, avec le système PROCULTURE on s'attendait toujours à avoir des infections sur F3 et F2 avant F1, alors que les résultats en 2007 font apparaître le cas contraire. Des infections ont été observées sur F1 sans avoir le moindre symptôme sur F2 et F3. La première hypothèse la plus plausible serait la contribution de la forme téléomorphe *M. graminicola*. La deuxième hypothèse qui pourrait être envisagée semble liée au mécanisme de la dispersion des spores. En effet, PROCULTURE se base sur le phénomène de l'éclaboussure (rain-splash) des gouttelettes en suspension pour expliquer la dynamique de l'évolution de l'épidémie (Figure II-4-6). La dispersion de l'inoculum par les éclaboussures suit un gradient vertical. Dans cette deuxième hypothèse on privilégie, par contre, le mode de transport aérien des spores incorporées au sein ou à la surface des gouttelettes qui constituent un nuage de spores au dessus du couvert. La feuille F1 serait en contact direct avec la suspension de spore et serait par conséquent la première à être infectée.

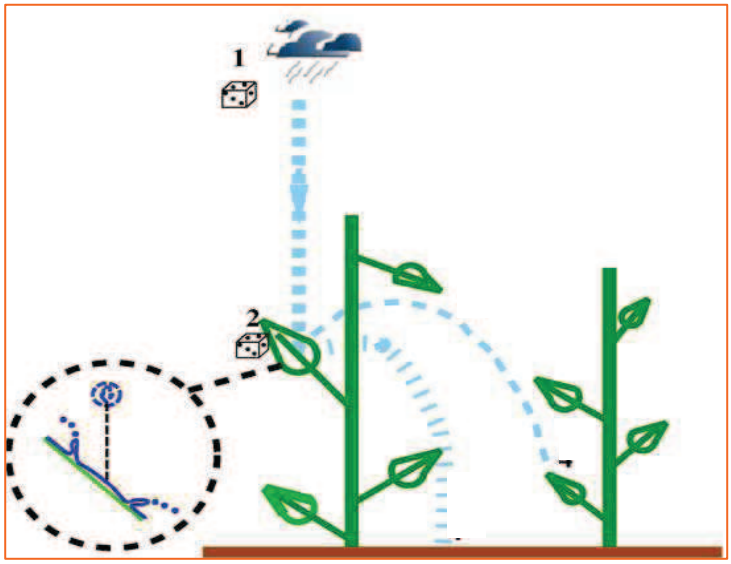


Figure II-4-6. Représentation schématique du mécanisme de la dispersion des gouttelettes de pluie dans le couvert végétal. (1) gouttes de pluie, (2) l'interception de la goutte d'eau par un élément du couvert (Saint-Jean et al., 2004).
Schematic representation of the interaction between raindrops and canopy elements. (1) sampling of the raindrops; (2) the interception of the raindrop by an element of the canopy structure (Saint-Jean et al., 2004).

Il est fort peu probable d'arriver à définir une période d'infection pour *S. tritici* en terme de période d'humectation continue ou discontinue (Shaw, 1990). Néanmoins, via des ajustements statiques des données de simulation, nous avons pu établir une relation entre les périodes d'humectation simulées et l'apparition de la maladie sur feuilles ; et une durée d'humectation minimale pour l'infection a été déterminée.

Alternativement, au lieu de travailler à la définition de la durée minimale d'humectation nécessaire à l'infection, les valeurs observées et simulées pourraient être considérées comme points de référence pour calibrer les modèles d'humectation et les modèles épidémiologiques. L'objectif final sera atteint. Dans ce cas-ci, il peut présumer que le modèle de la durée d'humectation devrait également être validé sur des données d'observation de la maladie en plein champ et sur une certaine période afin d'être inclus ainsi dans la simulation épidémiologique. À noter qu'actuellement au G-D de Luxembourg une base de données (d'une période de 8 ans) d'observations de la maladie de la septoriose est disponible.

En se basant sur les résultats obtenus dans cette étude, l'utilisation d'un modèle de la durée d'humectation pourrait produire de meilleurs résultats en terme de prédiction d'infection que PROCULTURE, en particulier lorsqu'une infection est due à la rosée. De ce fait, pour un contrôle efficace de la maladie, l'introduction du paramètre "durée d'humectation" devient une nécessité. Cette utilisation ouvre d'autres perspectives concernant d'autres maladies notamment les rouilles.

Les résultats ont été obtenus à partir d'une méthodologie qui permettrait une utilisation à la fois des données de simulation de la durée d'humectation et du développement de la septoriose pour la protection de la culture du blé d'hiver. L'utilisation d'un modèle de la détermination des surfaces végétales foliaires humectées (SWEB) et du modèle PROCULTURE peut constituer une alternative intéressante pour le contrôle des risques épidémiques en particulier pour le contrôle des périodes d'infection de *S. tritici.* Le modèle SWEB se base sur des variables agrométéorologiques et le bilan énergétique et le modèle PROCULTURE se base sur des données phytopathologiques. Ces deux modèles combinés peuvent constituer un outil important pour des applications opérationnelles. Leur intégration avec d'autres outils de télédétection à savoir le radar météorologique et les systèmes d'information géographique est de grande importance pour l'établissement des cartes d'infection. Ce système serait capable de donner aux utilisateurs finaux, des informations détaillées et utiles pour optimiser la protection des cultures et afin de réduire le nombre d'applications des produits de traitement tout en maintenant une qualité de production avec un bas impact sur l'environnement.

En conclusion on peut dire que :

- L'impact des périodes d'humectation sur le développement de la septoriose sur différentes variétés du blé d'hiver a été étudié durant deux saisons culturales. Les

périodes d'humectation simulées par le modèle SWEB ont été comparées aux périodes d'infection de *S. tritici* simulées par PROCULTURE et observées sur des parcelles d'essai. Les résultats obtenus ont souligné que l'utilisation combinée d'un modèle de détermination de la durée d'humectation et d'un modèle de prévision des risques épidémiques était très encourageante. L'utilisation conjointe des deux modèles constitue donc une alternative intéressante au système existant pour le contrôle des maladies en culture de blé d'hiver. Une durée minimale d'humectation favorable à l'infection des feuilles de blé par *S. tritici* a été déterminée.

- Le modèle de la durée d'humectation simule avec succès des périodes d'humectation, due à la fois à la rosée et à la pluie, qui peuvent déclencher les infections de la septoriose observées sur des parcelles expérimentales. Le modèle choisi permet par conséquent de prévoir les variations spatio-temporelles de la durée d'humectation et constitue donc une méthode contribuant à la prévision des risques épidémiques et à l'élaboration des avertissements agricoles.

- Il est connu que l'humectation se répartit à la surface des feuilles sous forme de film ou de gouttelettes. La forme de la surface de la feuille peut influencer l'humectation et l'eau peut prendre différentes formes (film d'eau, gouttelettes,…). Néanmoins, il n'est pas encore vérifié si cette variabilité affecte le mouvement des ascospores sur la surface des feuilles. En conclusion, il reste beaucoup d'incertitudes entourant le nombre d'heures consécutives d'humectation nécessaires à l'infection des feuilles. Une étude approfondie et détaillée de la biologie de *S. tritici* et de ses modalités d'infection aurait pu être extrêmement utile pour une définition précise et appropriée de la durée d'humectation minimale nécessaire à l'infection.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableaux :

Tableau II-4-1. Description des caractéristiques du site d'essai 159
Tableau II-4-2. Comparaison statistique des données d'observation et de simulation par PROCULTURE des occurrences d'infection de la septoriose durant les deux saisons culturales 2006 et 2007 dans des parcelles d'essai sur le site d'Arlon. Cette comparaison est basée sur les tableaux de contingence. Le pourcentage de l'estimation visuelle de développement de la maladie correspond à une valeur moyenne de 120 plantes dans 4 parcelles choisies de façon aléatoire (30 plantes/parcelle)……..……162
Tableau II-4-3. Résultats des indices de contingence calculés pour un seuil de périodes d'humectation de 11h..……...170

Figures :

Figure II-4-1. Comparaison entre les données d'observation et de simulation du développement *S. tritici* et les périodes d'humectation simulées par le modèle SWEB sur les trois dernières feuilles au niveau du site d'Arlon durant deux saisons culturales 2006..... 164
Figure II-4-2. Comparaison entre les données d'observation et de simulation du développement *S. tritici* et les périodes d'humectation simulées par le modèle SWEB sur les trois dernières feuilles au niveau du site d'Arlon durant deux saisons culturales 2007..... 166
Figure II-4-3. Relation entre les périodes d'humectation simulées par SWEB et le risque d'infection journalière des trois dernières feuilles attaquées par *S. tritici* simulée par PROCULTURE durant les saisons culturales 2006 et 2007. 167
Figure II-4-4. Représentation graphique de la distribution des périodes d'humectation en fonction de l'infection journalière des feuilles de blé par *S. tritici*. Le graphe représente les "boites à moustache" (Box & Whiskers Plot) par groupe d'infections journalières (groupe 0, 1, 2, 3, 5, 10). La médiane de chaque groupe est représentée par le trait à l'intérieur de la boite. Les points (□) représentent les valeurs atypiques (outliers). 168
Figure II-4-5. Comparaison des scores POD, PC et POFD en fonction de différents seuils de durée d'humectation. 169
Figure II-4-6. Représentation schématique du mécanisme de la dispersion des gouttelettes de pluie dans le couvert végétal. (1) gouttes de pluie, (2) l'interception de la goutte d'eau par un élément du couvert (Saint-Jean et al., 2004). 171

REFERENCES

Brown, J. K. M., Kema, G. H. J., Forrer, H. R., Verstappen, E. C. P., Arraiano, L. S., Brading, P. A., Foster, E. M., Fried, P. M., and Jenny, E. (2001). Resistance of wheat cultivars and breeding lines to *Septoria tritici* blotch caused by isolates of *Mycosphaerella graminicola* in field trials. *Plant Pathology* **50**, 325-338.

Calay, F., Coquillart, L., Lucas, C., Lemaire, D., Bodson, B., Moreau, J. M., and Maraite, H. (2002). Lessons from year 2001 *Mycosphaerella graminicola* epidemic on winter wheat in Belgium. Vol. 67, pp. 197-204, Meded Rijksuniv. Gent Fak. Landbouwkd Toegep. Biol. Wet.

Ciancio, A., and Mukerji, K. G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601. 359 pages.

Cicogna, A., Dietrich, S., Gani, M., Giovanardi, R., and Sandra, M. (2005). Use of meteorological radar to estimate leaf wetness as data input for application of territorial epidemiological model (downy mildew-*Plasmopara viticola*). *Physics and Chemistry of the Earth* **30**, 201-207.

Dalla Marta, A., Gani, M., Cicogna, A., Dietrich, S., Orlandini, S., and Santorelli, E. (2007). Transboundary system for grapevine downy mildew risk evaluation on a territorial scale (P. Rada project). *Bulletin OEPV/EPPO* **37**, 290-294.

Dalla Marta, A., Magarey, R. D., and Orlandini, S. (2005). Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 84-95.

El Jarroudi, M. (2005). Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé

d'hiver au G-D de Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision. *Thèse de Doctorat, Université de Liège.*

El Jarroudi, M., Delfosse, P., Maraite, H., Hoffmann, L., and Tychon, B. (2009). Assessing the accuracy of simulation model for *Septoria* Leaf blotch disease progress on winter wheat. *Plant Disease* **93**, 983-992.

El Jarroudi, M., Tychon, B., and Maraite, H. (2002). Validation of "Proculture" model to predict *Septoria tritici* on winter wheat in the G-D of Luxembourg in 2001. *In* "VII Congress of the European Society for Agronomy", pp. 275-276. Book of Proceedings (Editors : Francisco J. Villalobos & Luca Testi). Consejeria de Agricultura y Pesca. Congresos y Jornadas. ISBN 84-8474-059-5, Cordoba. Spain.

Eyal, Z., Scharen, A. L., Huffman, M. D., and Prescott, J. M. (1985). Global insights into virulence frequencies of *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology* **75**, 1456-1462.

Forrest, W., and Nutter, J. R. (2007). The role of plant disease epidemiology in developing successful integrated disease management programs. In: Ciancio, A., and Mukerji, K.G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601, 359 pages. 45-79.

Hoppmann, D., and Wittich, K. P. (1997). Epidemiology-related modelling of the leaf-wetness duration as an alternative to measurements, taking *Plasmopara viticola* as an example. *Zeitschrift Fur Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz-Journal of Plant Diseases and Protection* **104**, 533-544.

Huber, L., and Gillespie, T. J. (1992). Modeling leaf wetness in relation to plant-disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology* **30**, 553-577.

King, J. E., Cook, R. J., and Melville, S. C. (1983). A review of *Septoria* diseases of wheat and barley. *Ann. Appl. Biol.* **103**, 345-373.

Lhomme, J. P., and Jimenez, F. (1992). Estimating dew duration on banana and plantain leaves from standard meteorological observations. *Agricultural and Forest Meteorology* **62**, 263-274.

Magarey, R. D. (1999). A theoretical standard for surface wetness estimation. *Ph.D. Diss. Cornell University, Ithaca, NY.*

Magarey, R. D., Russo, J. M., Seem, R. C., and Gadoury, D. M. (2005). Surface wetness duration under controlled environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **128**, 111-122.

Magarey, R. D., Seem, R. C., and Russo, J. M. (2006). Grape canopy surface wetness: Simulation versus visualization and measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 361-372.

Magarey, R. D., and Sutton, T. B. (2007). How to create and deploy infection models for plant pathogens. In: Ciancio, A., and Mukerji, K.G. (2007). General concepts in integrated pest and disease management. Edition: illustrated. Publié par Springer, ISBN 1402060602, 9781402060601. 359 pages.

Moreau, J. M., and Maraite, H. (1999). Integration of knowledge on wheat phenology and *Septoria tritici* epidemiology into a disease risk simulation model validated in Belgium. *Aspects of Applied Biology* **55**, 1-6.

Moreau, J. M., and Maraite, H. (2000). Development of an interaction decision-support system on a web site for control of *Mycosphaerella graminicola* in winter wheat. *Bulletin OEPV/EPPO* **30**, 161-163.

Papastamati, K., McCartney, H. A., and van den Bosch, F. (2004). Modelling leaf wetness duration during the rosette stage of oilseed rape. *Agricultural and Forest Meteorology* **123**, 69-78.

Royle, D. J., Lovell, D. J., Coakley, S. M., and Shaner, G. (1993). Predicting the effects of climate change on *Septoria tritici* on winter wheat. *In* "Abstracts of the 6th International Congress of Plant Pathology", Vol. 5.1.7 (abstract), Montreal, Canada.

Royle, D. J., Shaw, M. W., and Cook, R. J. (1986). Patterns of development of *Septoria nodorum* and *S. tritici* in some winter wheat crops in Western Europe 1981-83. *Plant Pathology* **35**, 466-476.

Shaw, M. W. (1990). Effects of temperature, leaf wetness and cultivar on the latent period on *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat. *Plant Pathology* **39**, 255-268.

Shaw, M. W., and Royle, D. J. (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, M. W., and Royle, D. J. (1993). Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) on winter wheat in the U.K. *Plant Pathology* **42**, 882-899.

Zadoks, J. C., Chang, T. T., and Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* **14**, 415-421.

DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Discussion générale et perspectives

APPORT DE L'ÉTUDE

Contexte général et cadre d'étude
Validité de l'étude et limites des résultats
Synthèse des résultats de l'application agrométéorologique du radar météorologique

Problématique liée à la technologie radar
Validation des cumuls mensuels de précipitations radar
Validation des occurrences horaires de précipitations radar
Impact des estimations radar sur la détermination des périodes d'infection de la septoriose

Synthèse des résultats de l'adaptation du modèle SWEB pour le contrôle des périodes d'infection de Septoria tritici

La mesure de la durée d'humectation par les capteurs
La simulation de la durée d'humectation par le modèle SWEB
Évaluation du modèle SWEB pour le contrôle des périodes d'infection de la septoriose

DISCUSSION GÉNÉRALE

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

RÉFÉRENCES

APPORT DE L'ÉTUDE

CONTEXTE GÉNÉRAL ET CADRE DE L'ÉTUDE

Cette étude intitulée : "Images radar des précipitations et durée d'humectation simulée pour l'évaluation des risques potentiels d'infection du blé d'hiver par la septoriose" s'inscrit à l'interface des disciplines de l'agrométéorologie et de la phytopathologie. Elle voudrait contribuer à améliorer la compréhension de l'interaction entre l'atmosphère, la culture de blé d'hiver et les agents cryptogamiques, principalement la septoriose.

Les travaux présentés dans cette thèse ont pour objectif de contribuer à l'amélioration des systèmes d'avertissement des différentes maladies cryptogamiques affectant le blé d'hiver au sud de la Belgique et au G-D de Luxembourg. Notre travail a permis d'acquérir, par l'analyse des données agrométéorologiques et des données phytopathologiques, les connaissances nécessaires à l'élaboration et à l'amélioration d'un système de lutte contre les différentes maladies cryptogamiques du blé d'hiver. L'élaboration d'un tel système doit permettre à terme d'assurer une meilleure rentabilité économique par la réduction du nombre de traitements fongicides et une diminution des impacts environnementaux. Ce travail est constitué d'une suite des travaux réalisés au Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège sur l'évaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au G-D de Luxembourg (El Jarroudi, 2005) et l'élaboration d'un système intégré d'avertissement des différentes maladies du blé d'hiver au G-D de Luxembourg (El Jarroudi et al., 2007). En outre, ce travail a aussi pour objet de démontrer le rôle des variables agrométéorologiques dans la gestion des maladies des plantes.

Pour répondre à ces objectifs nous avons organisé la discussion autour de deux points abordant successivement :

(1) la problématique liée à la technologie radar et l'utilisation des données qui en sont issues comme entrées des modèles de la détermination de durée d'humectation et de la simulation des périodes d'infection de *S. tritici* ;
(2) la détermination des périodes d'humectation par différentes méthodes et leur relation avec le développement de la septoriose du blé d'hiver.

VALIDITÉ DE L'ÉTUDE ET LIMITES DES RÉSULTATS

Cette étude ne représente qu'une première étape de l'utilisation agrométéorologique du radar. Elle s'intègre et constitue le préalable à un programme de recherche plus vaste consacré à la spatialisation des systèmes d'avertissement pour les principales maladies du blé d'hiver au sud de la Belgique et au G-D de Luxembourg.
Notre travail a permis, dans un premier temps, de définir le rôle que pourrait jouer le radar et de préciser les conditions de son utilisation dans le cadre d'une première exploitation opérationnelle. Il a permis, dans un deuxième temps, de quantifier l'effet des périodes d'humectation sur l'infection de la septoriose.

Il s'agit d'appréhender le bénéfice que l'agrométéorologie peut espérer retirer de l'utilisation du radar et de fournir les éléments de décision de son utilisation pour le contrôle des périodes d'infection des principales maladies cryptogamiques affectant le blé d'hiver. Pour ce faire nous nous somme appuyé sur une comparaison ponctuelle des données radar-pluviomètre durant trois saisons culturales afin de mieux cerner les atouts présentés par le radar mais aussi les problèmes qu'il soulève. Les résultats obtenus n'ont pas été généralisés à d'autres modèles. Cette étude doit être perçue comme une première étape dans le développement de la valorisation des images radar en agrométéorologie.

Cette étude a été menée au sein de parcelles expérimentales mises en place à la station d'agrométéorologie de l'Université de Liège à Arlon et sur des sites d'essai d'Everlange, Reuler et Burmerange au G-D de Luxembourg. Le suivi des périodes d'humectation a été réalisé sur des parcelles de tailles réduites. L'expérimentation ne prend pas en compte l'effet latéral causé par des bandes non cultivées qui séparent les parcelles.
Différentes variétés de blé d'hiver ont été testées durant cette étude afin de se rapprocher des conditions locales. Ces variétés, largement utilisées au G-D de Luxembourg, ont des caractéristiques différentes (tardive et hâtive, sensibilités différentes aux maladies). Le modèle d'humectation ne prend pas en considération les caractéristiques de la feuille.
Seule la septoriose a été considérée dans ce travail. Cette maladie foliaire est actuellement la plus fréquente et la plus nuisible sur le blé en Europe. En effet, la septoriose est la principale maladie foliaire affectant le blé d'hiver au G-D Luxembourg (El Jarroudi et al., 2009) et au sud de la Belgique (Moreau et Maraite, 1999).

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR L'APPLICATION AGROMÉTÉOROLOGIQUE DU RADAR MÉTÉOROLOGIQUE

- Problématique liée à la technologie radar

L'utilisation quantitative et qualitative de la mesure des précipitations radar comme donnée d'entrée des modèles de simulation agrométéorologiques exige une bonne connaissance de la qualité des estimations de précipitations fournies par le radar. Les questions afférentes à la précision de la mesure radar, sa relation avec les stations au sol et son utilisation dans des modèles de prévision des maladies de blé d'hiver ont fait l'objet de ce présent travail.

Des observations radar et des réseaux de stations météorologiques ont été utilisées pour étudier l'impact des périodes pluvieuses sur l'infection et le développement de la septoriose au sud de la Belgique et au G-D de Luxembourg. Les données d'estimation des précipitations radar ont été extraites des images du radar de l'IRM. Le radar fournit des données à un intervalle de temps de 5 minutes sur une grille (pixel image) dont la taille des pixels est de l'ordre de 600 mètres de côté. Les images fournies par le radar météorologique de l'IRM sont générées en temps réel toutes les 5 minutes.

Les mesures radar sont moins précises que les mesures de précipitations des pluviomètres. Néanmoins, le radar permet d'observer en temps réel les précipitations sur un large domaine avec une très bonne résolution spatiale et temporelle. L'estimation des précipitations par radar est influencée par plusieurs facteurs qui peuvent être sources possibles d'erreur (Partie I-Chapitre 1). Certaines erreurs affectent les mesures de réflectivité et d'autres affectent les estimations de précipitations dérivées des réflectivités mesurées à une certaine altitude. Les principaux facteurs d'inexactitude sont : la relation *Z-R*, les valeurs par défaut de (a) et (b) (a= 200, b=6) qui dépendent du type de précipitations (stratiforme ou convective), pourraient être la source d'erreur la plus importante (Ulbrich et Lee, 1999; Workneh et al., 2005; Workneh et al., 2006). La variation de la distribution de la taille des gouttes de pluie dans les nuages (qui peut varier selon les types de précipitations) peut affecter la réflectivité *(Z)* et par conséquent aura un impact sur le taux de précipitations estimé. Une autre source d'erreur de l'estimation est la distance de la station par rapport au radar. À des distances très éloignées le faisceau radar peut passer au dessus des nuages (overshooting) et par conséquent le radar sous-estimera les quantités de précipitations. Dans certains cas, les précipitations en dessous du faisceau radar s'évaporent avant d'arriver au sol, ce qui provoque une surestimation des

estimations radar. Une autre source d'erreur est la propagation anormale, la bande brillante[1] et le caractère non uniforme de la répartition verticale des précipitations, ce qui conduit à une surestimation. De nouvelles erreurs apparaissent lorsqu'on estime le cumul de précipitations en raison du fait que le radar n'observe pas les précipitations de manière continue mais avec un échantillonnage temporel (qui est de 5 minutes pour le radar de l'IRM). Enfin, les recherches les plus récentes montrent qu'une des sources d'erreur les plus importantes affectant les estimations de précipitations en surface résulte de la non uniformité des profils verticaux de réflectivité (PVR) associée au fait que le radar mesure les réflectivités à une certaine altitude et non pas en surface. Plusieurs algorithmes visant à corriger cet effet sont proposés dans la littérature. L'idée consiste à estimer, d'une manière ou d'une autre, la forme du PVR et d'utiliser cette information pour extrapoler les réflectivités mesurées en altitude vers la surface.

- Validation des cumuls mensuels de précipitations radar

La validation des données radar se fait généralement par comparaison aux données des stations au sol. Ce travail a visé principalement la validation qualitative (occurrence des données horaires) des données radar, la validation quantitative (cumuls mensuels) a été seulement évoquée. Une validation des cumuls mensuels des estimations a été réalisée sur une période de trois saisons culturales, 2003, 2004 et 2005. Le rapport R/G[2] des cumuls mensuels radar (R = Radar) et des cumuls mensuels pluviométriques (G = Gauge) est calculé pour chaque mois et pour chaque station. La qualité d'estimation se dégrade avec la distance par rapport au radar (Figure I-2-4, Annexe A) en particulier pour les précipitations stratiformes durant les mois d'hiver. Le radar a tendance à sous-estimer les quantités de précipitations (Table I-2-2). L'erreur calculée pour l'ensemble des stations varie entre -50% et +12%. Une très grande variabilité temporelle des rapports R/G a été observée (Annexe A). La mauvaise adéquation entre les paramètres a et b de la relation *Z-R* qui dépend du type de précipitations, l'écho du sol, l'atténuation, et l'overshooting, sont à l'origine des sous-estimations et sur-estimations des quantités de précipitations. Le profil vertical de réflectivité constitue à lui seul une importante source d'erreurs (Andrieu et al., 1997; Creutin et al., 1997; Workneh et al.,

[1] Ce phénomène correspond à une zone nuageuse dans laquelle la neige est en train de se transformer en pluie. Cette neige fondante ou mouillée possède un niveau de réflectivité beaucoup plus élevé que la neige normale et plus élevé que la pluie. Le phénomène des bandes brillantes survient à des altitudes où la température avoisine zéro°C. Les températures de la partie supérieure du nuage sont inférieures au point de congélation et celles de la partie du nuage située près du sol sont situées au-dessus du point de congélation.

[2] (R/G = radar/pluvio [gauge en anglais])

2005; Workneh et al., 2006). Le phénomène de la bande brillante est plus accentué pour des précipitations de type stratiforme que pour des précipitations de type convectif. L'effet de la bande brillante disparaît graduellement avec la distance par rapport au radar (Berne et al., 2005; Delobbe, 2006).

- **Validation des occurrences horaires de précipitations radar**

L'évaluation de la précision des estimations radar a été faite sur une période de trois ans par comparaison des occurrences de précipitations horaires estimées par le radar à celles mesurées par 77 stations pluviométriques du MET-SETHY (Partie I-Chapitre 2). La comparaison a été faite par l'analyse des tableaux de contingence pour chaque station (Table I-2-1). Les valeurs de POD varient entre 0.44 et 0.80 durant la période étudiée (Table I-2-2). La valeur moyenne calculée pour l'ensemble des stations est de 0.7. L'analyse des résultats montre que le radar signale parfois de la pluie alors qu'elle n'est pas observée au niveau des stations pluviométriques et dans certain cas on observe la pluie au sol alors qu'elle n'est pas détectée par le radar (Table I-2-3, I-2-4 et Annexe C). En outre, le radar a tendance à mieux estimer les occurrences de précipitations à partir d'un certain seuil. Ce seuil correspond à un volume de pluie minimum pour considérer qu'il y a réellement des précipitations. Dans notre cas, un seuil au-delà de 0.1 mm/hr mais inférieur à 0.2 mm/hr semble bien améliorer la précision des estimations radar (Figure I-2-6).

- **L'impact des estimations radar sur la détermination des périodes d'infection de la septoriose**

Nous avons montré dans cette étude que la technologie radar était suffisamment bonne pour offrir des informations nécessaires au système d'avertissement. L'impact des estimations radar sur les périodes d'infection simulées par PROCULTURE a été évalué dans cette étude (Partie I-Chapitre 3). L'évaluation a été faite par comparaison à des données de simulation et à des observations de la maladie. La vérification est d'abord faite en comparant le nombre d'heures par jour de risque d'infection par *S. tritici* fourni par PROCULTURE en utilisant des données d'entrée de deux sources différentes :

- les précipitations mesurées au sol par 14 stations pluviométriques ;
- les précipitations estimées par le radar au-dessus de ces mêmes 14 points (Table I-3-1).

Ensuite le modèle a été validé pour les deux types de données par des estimations visuelles de la maladie en utilisant les données issues de 4 stations (Table I-3-2).

Un nombre important d'événements a été analysé durant une période de trois ans pour évaluer les potentialités du radar à simuler les périodes d'infection de *S. tritici* sur les trois dernières feuilles des différentes variétés du blé d'hiver. Le POD calculé durant la période était de 83% et la valeur moyenne de FAR était de 24% pour les 14 stations étudiées (Table I-3-1). Dans un système de prévision des maladies, il est important d'avoir une valeur de POD élevée. En effet, l'agriculteur sera plus ennuyé par des erreurs d'omission (faible POD) car cela aurait pour conséquence que des périodes d'infections pourraient ne pas être prises en compte dans PROCULTURE et cela entrainerait l'apparition de symptômes inattendus et donc un traitement trop tardif.

Sur 171 événements analysés durant trois saisons culturales étudiées en comparant les données observées et simulées, le nombre d'heures favorables à l'infection par *S. tritici* simulé par PROCULTURE en utilisant les données radar ou les pluviomètres sur nos sites d'essai (Humain, Burmerange, Useldange et Reuler) n'est pas significativement différent (Table I-3-2). Par exemple, dans le site d'Humain, 90% des symptômes observés ont été correctement simulés par le modèle en utilisant les données radar, alors que seulement 79% des cas ont été simulés avec succès en utilisant les stations météo (Table I-3-2). En outre, seulement 4% des symptômes de *S. tritici* observés n'avaient pas été correctement simulés par PROCULTURE en utilisant les données radar (Table I-3-2).

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ADAPTATION DU MODÈLE SWEB POUR LE CONTRÔLE DES PÉRIODES D'INFECTION DE *Septoria tritici*

L'objectif principal de cette partie d'étude a été l'amélioration des systèmes d'avertissement par l'introduction du paramètre de durée d'humectation dans un modèle agrométéorologique d'infection cryptogamique. Cette durée d'humectation est une valeur simulée par la modèle SWEB. L'utilisation de ce modèle de durée d'humectation à côté du modèle prévisionnel PROCULTURE, est d'une extrême importance pour le système intégré d'avertissement des différentes maladies cryptogamiques affectant le blé d'hiver.

- La mesure de la durée d'humectation par les capteurs

Dans cette étude, nous avons utilisé les capteurs de la mesure de durée d'humectation de type Campbell Scientific., modèle 237[3] (Figure. II-2-2). L'évaluation des performances de ces capteurs a fait l'objet de plusieurs recherches dans d'autres études et sur différentes cultures (Dalla Marta et al., 2007b; Magarey et al., 2006b; Sabatini et al., 2005; Santos et al., 2008;

3 (http://www.campbellsci.com/leafwet.html)

Sentelhas et al., 2004a; Sentelhas et al., 2007; Sentelhas et al., 2004b). Le but de notre travail a été de calibrer ces capteurs d'humectation dans des parcelles de culture de blé d'hiver selon les conditions climatiques régionales (Partie II-Chapitre 2) pour pouvoir ensuite les utiliser pour le contrôle et l'évaluation des performances du modèle de simulation SWEB (Partie II-Chapitre 3). Durant deux saisons culturales, 2006 et 2007, la durée d'humectation a été mesurée au moyen de trois capteurs. Les capteurs ont été calibrés sur des parcelles expérimentales par estimation visuelle de la durée d'humectation à la surface des feuilles de blé d'hiver. La calibration a été faite par ajustement d'un seuil de transition dry/wet en déterminant la résistance électrique entre l'état sec et humide. Les valeurs de 220 et 6800 kΩ ont été fixées respectivement pour les capteurs sans et avec peinture. La variabilité autour des trois capteurs utilisés a été déterminée par leur coefficient de variation. La variation autour des trois capteurs a été de 40 minutes (pour une durée d'humectation moyenne journalière de 11.63h) en 2006 et de 50 min (pour une durée d'humectation moyenne journalière de 9.54h) en 2007.

L'évaluation des performances des trois capteurs utilisés dans cette étude a été faite sur un ensemble d'événements de rosée et de pluie qui sont survenus durant les deux saisons culturales 2006 et 2007 (Table II-2-2). L'évaluation a été réalisée par comparaison entre les données de mesure et les données d'observation du début de la rosée, de la fin d'humectation et de la durée totale d'humectation. L'erreur moyenne (MAE) de la durée d'humectation pour les trois capteurs est respectivement de 0.79, 1.05 et 0.98 heures en 2006 et de 1.34, 1.05 et 0.91 heures en 2007 (Table II-2-5). En général, les capteurs ont sous-estimé la durée d'humectation durant les deux saisons culturales. Les capteurs ont parfois détecté des périodes d'humectation avant ou après que l'humectation soit observée sur les feuilles.

- La simulation de la durée d'humectation par le modèle SWEB

Dans cette étude, le modèle utilisé pour la simulation de la durée d'humectation à la surface des feuilles de culture du blé d'hiver, appelé SWEB, a été sélectionné en se basant sur une étude bibliographique (Partie II-Chapitre 1). Il se base sur le bilan énergétique et le bilan hydrique et simule la durée d'humectation due à la pluie et à la rosée sur l'ensemble du couvert végétal à partir des données issues des stations agrométéorologiques. Le modèle a été testé sur un ensemble d'événements de rosée ou de pluie (Table II-3-4) et sur différentes variétés de blé d'hiver (Tableau II-2-1) en utilisant les données météorologiques horaires de la station d'Arlon. L'analyse de sensibilité du modèle montre que les paramètres les plus

importants sont l'indice foliaire *(LAI),* la hauteur du couvert *(Zc)* et *Wmax* (Maximum wet area) (Figure II-3-2). Les variables météorologiques les plus sensibles sont l'humidité relative et le rayonnement (Figure. II.3.3, 4).

L'évaluation du modèle SWEB a été faite pour le début de dépôt de rosée (Table II-3-5), la fin de l'humectation (Table II-3-6) et la durée entre le début et la fin d'humectation (Table II-3-7). Les données de simulation ont été comparées statistiquement aux mesures des capteurs et aux données d'observation obtenues sur des parcelles d'essai durant deux saisons culturales 2006 et 2007. Sur base des résultats obtenus de la comparaison quantitative des données, le modèle SWEB semble sous-estimer la durée d'humectation de 0.71 h en 2006 et 2.48 h en 2007 (Table II-3-7). La précision du modèle est meilleure pour détecter le dépôt de la rosée que le dessèchement du couvert. Enfin, en analysant les résultats obtenus, une légère différence a été observée entre les deux sources d'humectation (pluie et rosée) et, dans les deux cas, la simulation des périodes de fin d'humectation est moins précise.

L'évaluation qualitative des données de simulation a montré également que le modèle a une légère tendance à sous-estimer le nombre d'heures total d'humectation, les valeurs de BIAS étant inférieures à 1 (Table II-3-8). La même tendance a été observée lorsqu'on compare les données des capteurs et les données de simulation. En comparant le nombre total d'heures humides et sèches simulées par le modèle, nous constatons que le modèle détecte mieux l'occurrence des événements secs (dry hour) que ceux humides (wet hour). Ceci résulte du nombre d'heures sèches qui est toujours supérieur au nombre d'heures humides (considérant seulement la rosée et pas la pluie). Par conséquent, la détection de périodes sèches est beaucoup plus facile que la détection des heures humides (Dalla Marta et al., 2005).

- Évaluation du modèle SWEB pour le contrôle des périodes d'infection de la septoriose

Dans cette étude nous avons essayé d'obtenir une relation entre les périodes d'humectation et le développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles. Pour ce faire, les périodes d'humectation simulées par SWEB ont été comparées d'une part aux périodes d'infection de *S. tritici* simulées par PROCULTURE et aux estimations visuelles, d'autre part.

Nous avons d'abord évalué le modèle PROCULTURE pour la simulation des occurrences de la maladie sur les trois dernières feuilles par comparaison des données simulées avec l'observation des symptômes (Table II-4-2). Pour les deux saisons culturales, le modèle a sous-estimé les périodes d'infection sur F1 (dernière feuille formée), les valeurs de POD en

2006 et 2007 ont été respectivement de 94% et 93%. Des symptômes ont été bien observés dans les parcelles alors qu'ils n'étaient pas détectés par le modèle. Les données de simulations ont clairement révélé des différences importantes entre les étages foliaires et entre les années 2006 et 2007. En 2007, par exemple, les premiers symptômes sur F1 ont été observés le 21 mai. À cette date, le modèle n'a pas prédit correctement l'infection (Figure II-4-2). En théorie, avec le système PROCULTURE on s'attendait à avoir des infections sur F3 et F2 avant F1, alors que les résultats en 2007 font apparaître le cas contraire. Les infections ont été observées sur F1 sans avoir parfois aucune trace sur F2 et F3. Plusieurs questions se posent sur l'origine de ces lésions apparues sur F1. Depuis 2004 et pendant les années 2005 et 2006, des infections par ascospores disséminées par le vent en pleine saison ont été mises en évidence par de nombreuses études. Les ascospores pourraient donc infecter les feuilles par le haut et le bas. Trois hypothèses ont été envisagées pour expliquer ceci. La première hypothèse, la plus plausible, serait la contribution de la forme téléomorphe *M. graminicola*. La deuxième hypothèse qui pourrait être envisagée semble liée au mécanisme de la dispersion des spores. Une troisième hypothèse pourrait être envisagée par le fait que la durée d'humectation pourrait être plus élevée à la surface supérieure du végétal qu'à l'intérieur du couvert.

Par la simulation des périodes d'humectation, nous avons essayé de trouver une relation entre les périodes d'humectation et le développement de *S. tritici* sur les trois dernières feuilles. Le modèle de la durée d'humectation simule avec succès des périodes d'humectation, dues à la fois à la rosée et à la pluie, qui ont déclenché l'infection de la septoriose observée sur des parcelles expérimentales. Une relation entre les périodes d'infection et les périodes d'humectation a été établie dans le but de définir une période d'humectation nécessaire à l'infection. Une valeur approximative de 11 h d'humectation a été définie comme étant un seuil minimal pour permettre l'infection des feuilles de blé par la septoriose.

DISCUSSION GÉNÉRALE

La durée d'humectation de la surface foliaire constitue une variable agrométéorologique importante des modèles de simulation des maladies des plantes et des systèmes d'avertissement (Huber et Gillespie, 1992; Magarey et al., 2005). L'importance de ce paramètre fondamental relève de son rôle déterminant lors de la phase de contamination des plantes par de nombreux agents phytopathogènes (Campbell et Madden, 1990; Huber et Gillespie, 1992). Dans cette étude, la durée d'humectation a été analysée en relation avec son rôle dans l'épidémiologie des maladies de blé d'hiver et plus particulièrement la septoriose.

L'analyse des résultats de l'étude de la durée d'humectation souligne la difficulté liée à sa détermination à l'échelle de la feuille ou du couvert végétal. En effet, les observations de la durée d'humectation sont difficiles à réaliser et souffrent de la subjectivité de l'observateur. Le suivi d'humectation par l'estimation visuelle se fait sur des feuilles individuelles et par conséquent, il ne peut pas fournir une bonne approximation de la saturation totale du couvert. La méthode n'assure pas donc une bonne corrélation entre les valeurs observées, mesurées et simulées (Magarey et al., 2006b).

Les capteurs d'humectation ne sont pas toujours capables de fournir une indication précise de la présence ou de l'absence de l'humectation sur les feuilles. En général, les capteurs ont sous-estimé la durée d'humectation et par conséquent, on ne peut pas toujours se fier aux capteurs pour estimer la durée d'humectation dans un couvert de blé d'hiver : deux capteurs qui sont situés à une même hauteur peuvent présenter des réponses différentes (Dalla Marta et al., 2007b). Une multiplication du nombre de capteurs aboutira à une représentativité de l'humectation dans le couvert. Toutefois, il faut tenir compte du coût et de la difficulté de maintenance (Armstrong et al., 1993; Gillespie et Duan, 1987). La différence entre les valeurs observées et mesurées peut s'expliquer par le fait que le bilan énergétique au niveau de la feuille est différent de celui d'un capteur (Huber, 1992). En outre, les capteurs donnent une valeur de mesure indirecte et continue alors que les observations se font toutes les 15 minutes. Il est possible aussi que les composants hygroscopiques présents dans la peinture conduisent à une détection précoce dans des conditions très sèches (Lau et al., 1999; Magarey et al., 2006b). Dans la majorité des cas étudiés, l'assèchement des capteurs est beaucoup plus rapide que celui des feuilles dans le couvert. L'assèchement se fait plus facilement à la surface d'un capteur qu'à la surface des feuilles. En effet, la surface d'un capteur reçoit plus de rayonnement que les feuilles du couvert après le lever du soleil (Pedro et Gillespie, 1982a, b). L'altération de la surface des capteurs peut aussi réduire leur performance (Magarey et al., 2006b). Une forte variabilité de la durée d'humectation a été observée pour nos différents capteurs. Enfin, à la lumière des résultats obtenus, nous ne constatons pas de différence entre les capteurs avec ou sans peinture. Bien que l'application de trois couches de peinture se soit avérée efficace dans d'autres études (Lau et al., 2000; Potratz et al., 1994; Sentelhas et al., 2004a; Sentelhas et al., 2004b) cela ne s'est pas vérifié dans la notre. En conclusion, la mesure seule ne fournit pas une solution simple. Néanmoins, le capteur présente un véritable intérêt comme indicateur de précipitations et de rosée et pas comme donnée d'entrée principale pour un système d'avertissement. Placés à différents endroits du couvert, trois

capteurs d'humectation peuvent donner une indication du début et de la fin d'humectation (Magarey et al., 2005).

L'analyse des résultats a démontré que l'utilisation du modèle de simulation SWEB basé sur des variables issues des stations agrométéorologiques peut être considérée comme une alternative appropriée aux capteurs, mais l'attention doit être accordée à l'ajustement des paramètres du modèle et à sa validation au champ. Le modèle SWEB basé sur le bilan énergétique, en effet, peut prendre en compte tous les principaux éléments qui affectent la formation de rosée sur la surface des feuilles (Dalla Marta et al., 2007a; Magarey et al., 2006a; Magarey et al., 2006b; Rizzo et al., 2006). Les résultats font également apparaître que le modèle semble mieux simuler le début que la fin de l'humectation, ce qui conduit le plus souvent à une sous-estimation de la durée totale d'humectation au niveau du couvert. La mesure du rayonnement net au dessus et dans le couvert n'étant pas prise en considération dans cette étude, elle pourrait être une source importante d'erreur. L'un des problèmes d'utilisation du modèle SWEB résulte du fait que le rayonnement net ne fait pas partie des mesures effectuées par les stations des réseaux agrométéorologiques. Néanmoins, ce paramètre peut être estimé à partir du rayonnement global souvent mesuré dans les stations météorologiques. Si le rayonnement net n'est pas disponible, il pourrait être aussi estimé à partir de la couverture nuageuse avec une incertitude de 5% (Madeira et al., 2002). Un autre point important qui n'a pas non plus été considéré dans ce travail, et qui semblait avoir un effet sur la sous-estimation des périodes d'humectation, est l'ajustement de certains paramètres du modèle et plus particulièrement W_{max}. L'étude de l'analyse de sensibilité a montré que le modèle est sensible à ce paramètre (Figure II-3-2(a)). En effet, après une vérification de l'influence de ce paramètre sur l'estimation de la durée totale d'humectation, il apparaît que cette valeur doit être ajustée par les données d'observation.

Enfin, un avantage important de l'utilisation du modèle SWEB par rapport aux données du capteur est que le modèle peut prévoir la présence d'humectation si l'on dispose des données de modèles de prévisions météorologiques. Les événements antérieurs de la durée d'humectation peuvent être également obtenus à partir des données historiques.

Une forte corrélation entre les valeurs observées, mesurées et simulées de la durée d'humectation peut ne pas être importante si la relation entre la durée d'humectation et le développement de la maladie en conditions réelles n'est pas définie. Cette considération a mis en évidence les difficultés réelles de l'application de la mesure et de la simulation de la durée d'humectation au champ (Magarey et al., 2006b). La prévision de la maladie reste une

variable importante dans la plupart des modèles de détermination de durée d'humectation. Dans l'état actuel de la pratique agricole au G-D de Luxembourg, la variable agrométéorologique "durée d'humectation" n'est pas utilisée dans la prévision des risques épidémiques pour le contrôle des maladies cryptogamiques du blé d'hiver. L'humectation est pourtant indispensable à la multiplication des cycles de vie de la plupart des maladies cryptogamiques notamment celles du blé d'hiver (Henze et al., 2007). L'intérêt de développer une étude sur la durée d'humectation des feuilles dans des parcelles en culture du blé tient au large spectre des maladies cryptogamiques concernées et à la vocation opérationnelle. Une telle étude a pour finalité de procurer au pathologiste, un outil utilisable dans la modélisation des épidémies. Un aspect original de l'étude consiste en la détermination d'une durée d'humectation favorable à l'infection des feuilles de blé par *S. tritici* "durée d'humectation épidémiologique". Ce qui constituerait donc une méthode de prévision des risques épidémiques pouvant servir à l'élaboration des avertissements agricoles. Dans cette optique nous avons essayé d'obtenir une relation entre les périodes d'humectation et le développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles. Pour ce faire, les périodes d'humectation simulées par SWEB ont été comparées d'une part aux périodes d'infection de *S. tritici* simulées par PROCULTURE et aux estimations visuelles, d'autre part.

Avant de discuter les résultats obtenus sur la relation durée d'humectation et infection des feuilles de blé par la septoriose, certaines considérations doivent être clarifiées. L'exigence spécifique en nombre d'heures d'humectation pour l'infection de la septoriose est peu claire (Chungu et al., 2001; Shaw, 1990). L'étude sur sa signification biologique devrait être analysée et approfondie. En effet, l'étude épidémiologique des principales maladies qui ont été observées au G-D de Luxembourg a montré une grande variation entre les sites d'essais (El Jarroudi, 2005). Chaque maladie a ses exigences spécifiques en nombre d'heures de durée d'humectation qui peut varier d'un site à l'autre. Par exemple, le rôle de la durée d'humectation dans les processus de post-infection n'est pas encore suffisamment connu. De plus, il reste beaucoup d'incertitude concernant le nombre d'heures successives nécessaires au déclenchement de l'infection (Shaw, 1990). Une étude détaillée et approfondie sur la biologie *S. tritici* et ses modalités d'inoculation pourrait être extrêmement importante pour une définition précise et appropriée de la durée d'humectation. Dans ce contexte, l'utilisation des données de mesure et de la simulation serait plus fiable. En outre, au lieu de se concentrer sur la définition de la durée d'humectation et de la calibration des capteurs et des modèles, les mesures de la durée d'humectation peuvent être considérées comme données de référence sur lesquelles on peut calibrer les modèles épidémiologiques. Dans ce cas, la détermination de la

durée d'humectation ne représentera pas la situation réelle, mais pourrait nous conduire à une application correcte des modèles de simulation des maladies. En dehors de ces considérations, et en analysant les résultats obtenus dans cette étude, nous pouvons dire qu'il existe peu de différences en utilisant les différentes méthodes de détermination de la durée d'humectation. En utilisant la variable, durée d'humectation, et le modèle PROCULTURE, la sévérité de la maladie est presque correctement simulée (Figure II-4-1, 2).

Les applications des modèles SWEB et PROCULTURE ne montreront tout leur potentiel que si elles sont capables d'exprimer les humectations et les épidémies de manière spatiale, sur l'ensemble d'un territoire. Actuellement, une limitation majeure pour l'application opérationnelle de ces deux modèles, est la disponibilité des données d'entrée à proximité des différentes exploitations agricoles du territoire suivi. Le choix de l'emplacement de la station par rapport aux champs de céréales et sa distance par rapport aux autres stations météorologiques constituent de grandes contraintes pour l'agrométéorologiste.

La connaissance de la pluie pour chaque site (site-specific) constitue donc un élément fondamental pour l'étude et le fonctionnement des systèmes d'avertissement. Dans cette étude, nous nous intéressons donc à la pluie en tant que variable d'entrée du système d'avertissement. Avoir une estimation précise des précipitations, sur un large domaine avec une très bonne résolution spatiale et temporelle, pour l'application des modèles SWEB et PROCULTURE, est l'un des défis majeurs de cette étude.
La pluie est le facteur météorologique le plus variable dans le temps et l'espace (Hubbard, 1994; Krajewski et al., 2003). En raison de cette forte variabilité des précipitations et plus particulièrement celles à caractère convectif durant la saison culturale, il est nécessaire de disposer d'un réseau de pluviomètres très dense pour obtenir une incertitude acceptable sur la mesure de précipitations. L'obtention d'une densité suffisante de pluviographes n'est pas aussi simple (Groisman et Legates, 1994; Hubbard, 1994; Krajewski et al., 2003; Legates et Deliberty, 1993). En effet, il faudra tenir compte des particularités locales (relief, microclimat, vents dominants, …). Le réseau de stations météorologiques qui existe actuellement au G-D de Luxembourg n'est pas suffisant pour fournir une telle information. Par conséquent ce réseau ne peut pas répondre aux besoins d'un grand nombre d'agriculteurs et de producteurs de blé qui ne disposent pas de stations météorologiques à proximité de leurs champs de blé. L'utilisation du radar météorologique en complément de nouvelles technologies (Petersen et al., 1995; Yule et al., 1996) comme les systèmes d'information géographique facilitera,

comme nous l'avons montré (Partie I-Chapitre 3), l'implémentation du modèle dans des systèmes régionaux de protection des plantes. La faisabilité de l'utilisation du radar météorologique dans les applications agrométéorologiques a été étudiée dans ce travail (Partie I-Chapitre 1, 2 et 3). L'appréciation de la qualité des estimations de précipitations radar a été faite par comparaison ponctuelle radar-pluviomètres durant trois saisons culturales. Cette évaluation a été faite dans le but de vérifier l'utilisation des données radar en entrée de modèles de simulation SWEB et PROCULTURE.

Connaissant les limites de notre instrument de référence (pluviomètre) nous avons testé l'utilisation du radar météorologique de l'IRM pour évaluer le développement des maladies dans les parcelles de blé d'hiver au G-D de Luxembourg et au sud de la Belgique. En effet, la mesure par les pluviomètres peut constituer une source potentielle d'erreur, en particulier pour les faibles quantités de précipitations (l'erreur pour les stations au sol est généralement entre 5 et 10% (Sauvageot, 1994)). Par exemple le vent près du sol, les pertes par l'humidification des parois internes des pluviomètres (Groisman et Legates, 1994; Workneh et al., 2005; Workneh et al., 2006) peuvent parfois empêcher les gouttes de pluie d'arriver jusqu'à l'auget basculeur qui enregistre les précipitations lors de son basculement. La précision des pluviomètres est de 0.1 mm et est liée au degré de remplissage des augets au commencement d'un épisode pluvieux (vide, à moitié plein ou quasi rempli).
Le Radar météorologique peut fournir des cartes très détaillées de l'occurrence des précipitations avec une erreur inférieure à celle obtenue par les données des stations météorologiques (Table I-3-2). Ce nouveau produit peut être très utile pour les systèmes d'avertissement (Hagan et al., 1999; Kemerait et al., 2003) notamment pour le modèle PROCULTURE. En effet, l'évaluation du modèle PROCULTURE sur plusieurs sites en Belgique et G-D de Luxembourg durant plusieurs années, a montré son efficacité à déterminer le risque de progression de la septoriose dans des parcelles de blé (Calay et al., 2002; El Jarroudi et al., 2009; Junk et al., 2008; Lemaire et al., 2003; Moreau et Maraite, 1999). Le modèle permet déjà actuellement une large diffusion des avertissements agricoles au G-D de Luxembourg. Toutefois, la mise en place d'un système opérationnel plus performant pour les avertissements du moment optimal du traitement fongicide nécessite un réseau de stations météorologiques représentatif de tout le territoire. L'utilisation des données radar peut fournir cette information. Cet aspect a été vérifié dans cette étude. Sur base des résultats obtenus, relevons trois points importants à considérer dans l'application d'un modèle épidémiologique à l'échelle régionale utilisant les données radar: *(i)* il existe différentes sources d'erreur qui

affectent les données radar et les stations pluviométriques qui doivent être prises en compte lors de l'application du modèle, *(ii)* l'utilisation des données radar comme données d'entrée au modèle de simulation donne des résultats comparables à ceux obtenus avec les stations au sol, et *(iii)* cette étude a bien montré que le radar de l'IRM pourrait être utilisé, pour la prévision des risques épidémiologiques, en complément et non en substitution complète aux réseaux de pluviomètres. En effet, l'analyse statistique des résultats a révélé une variabilité spatiale et temporelle du rapport des cumuls mensuels (R/G) (Annexe A) et a mis en évidence une sous-estimation des quantités de précipitations par le radar (Table I-2-1). En outre, les valeurs de POD des occurrences horaires de précipitations (pour un seuil de 0.1 mm) varient de 0,44 à 0,80 et les valeurs de FAR sont assez élevées (de 0,21 à 0,44) (Table I-2-2). Mais si nous supposons que des précipitations se produisent de manière efficace lorsque la quantité des précipitations est supérieure au seuil de 0,1 mm, ce qui est généralement accepté dans la plupart des applications météorologiques, le POD moyen des précipitations augmente en moyenne à 0,87 et le FAR diminue à 0,14 (Figure I-2-5). Lorsque les données radar des précipitations ont été comparées aux stations au sol pour la simulation des périodes d'infection de *S. tritici*, la valeur de POD est de 83% avec une valeur de FAR non négligeable (24%) (Table I-3-1). Ce dernier diminue à 2% (FAR) lorsque la simulation des infections obtenues en utilisant les données radar, a été évaluée par rapport aux estimations visuelles de l'apparition des symptômes sur les feuilles (Table I-3-2).

Ces résultats confirment ceux obtenus par d'autres chercheurs concernant l'utilisation du radar pour des applications agrométéorologiques (Hagan et al., 1999; Kemerait et al., 2003; Rowlandson et al., 2004; Rowlandson et al., 2009; Workneh et al., 2006). En plus des erreurs radar, les valeurs des POD pour les événements d'infection peuvent aussi s'expliquer par les limites du modèle PROCULTURE : *(i)* le modèle considère que l'infection pourrait être causée uniquement par *S. tritici,* la forme conidienne du champignon qui provoque plus de dommage. Néanmoins, des études récentes ont démontré que l'inoculum ne provient pas exclusivement de conidies trouvées sur des résidus de la culture précédente comme précédemment affirmé, mais aussi sous forme d'ascospores produites sur les feuilles infectées de la culture en cours (Hunter et al., 1999; Kema et Silfhout, 1996); les ascospores contribuent ensemble avec les pycnidiospores au développement épidémique de *S. tritici* (Chen et Mac Donald, 1996; Eriksen et al., 2001; Hunter et al., 1999; Kema et Silfhout, 1996); *ii)* les symptômes pourraient apparaître 2 à 3 jours avant ou après par rapport à la date calculée et ne pas être détectés par les observations hebdomadaires au champ.

La simulation des périodes d'infection de la septoriose de blé durant trois saisons culturales en utilisant les données radar, semble au moins aussi pertinente que celles obtenues par l'utilisation des données des quatre stations pluviométriques. Cependant nous ne pouvons pas montrer une différence significative entre ces deux résultats. Cela signifie que, pour un site donné, le radar a la même aptitude à simuler les événements d'infection que les stations pluviométriques. Par conséquent, en raison de l'atout majeur de radars météorologiques qui permettent de couvrir la totalité de la surface où se situent les réseaux des stations pluviométriques, l'utilisation du radar peut se révéler être une alternative très prometteuse pour l'évaluation des risques de maladies propres à chaque site.

Des efforts sont actuellement mis en œuvre pour introduire des estimations de précipitations radar comme données d'entrée pour le modèle de simulation PROCULTURE et du modèle SWEB. Les résultats de cette étude pourraient contribuer à améliorer le système d'avertissement déjà opérationnel au G-D de Luxembourg et au sud de la Belgique, en prenant en compte les deux instruments de mesure des précipitations. Ils pourraient donc aussi contribuer à optimiser l'application des fongicides sur les plantes et agir tant sur les coûts que sur l'impact environnemental engendrés par ces produits. À moyen terme, si les résultats sont confirmés sur de longues périodes et pour un grand nombre de stations, nous pourrions envisager des systèmes d'avertissement des maladies basés uniquement sur le radar pour l'estimation des précipitations.

En conclusion, les résultats présentés dans notre travail peuvent être considérés comme une approche intéressante dans la simulation des épidémies et de l'élaboration des avertissements agricoles ; ce qui permettra une meilleure rationalisation de traitements fongicides et une plus large application des principes de lutte intégrée.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La synthèse des résultats permet de mettre en valeur les difficultés du sujet étudié. En effet, l'utilisation des données radar pour l'agriculture, comme données d'entrée aux modèles agrométéorologiques, semble prometteuse. Néanmoins, il existe différentes sources d'erreur qui affectent les estimations de précipitations dérivées des observations radar (Partie I-Chapitre 1, 2 et 3). La détermination de la durée d'humectation par la mesure, l'observation et la simulation sont très délicates et le développement de la maladie est fortement lié à la variabilité spatio-temporelle de ce paramètre.

Au terme de ce travail nous proposons les conclusions et les recommandations suivantes :

➔ Concernant le radar météorologique :

1. Nous avons montré les potentialités du radar météorologique à simuler les périodes d'infection de la septoriose du blé d'hiver. Nous avons vérifié ainsi notre hypothèse de départ sur l'application agrométéorologique des données radar et notamment pour la protection de la culture du blé. Nous avons testé dans ce travail l'utilisation du radar dans différentes régions au G-D de Luxembourg et au sud de la Belgique. L'utilisation des données radar pour déterminer les périodes d'infection de *S. tritici* sur une période de trois ans est très encourageante. L'élargissement de cette utilisation permettrait de répondre aux besoins des agriculteurs et à la demande émanant du secteur de la protection de la culture du blé d'hiver.

2. La méthode de vérification des scores statistiques est un bon moyen pour l'analyse et le diagnostic des erreurs d'estimation de l'occurrence de précipitations radar. Une analyse des données via cette méthode permet de connaître les sources d'erreur et d'estimer leur ampleur et elle permet en outre de savoir préalablement, avant toute utilisation, la précision, l'exactitude et la fiabilité des données.

3. La précision des données radar en relation avec les données des stations pluviométriques a été déterminée. Néanmoins, soulignons quelques limitations à l'utilisation de l'instrument en raison d'erreurs sources dues au fonctionnement et/ou à l'interprétation des images radar. La distance entre le radar et les points d'observation, par exemple, peut être un problème lors de l'utilisation des données radar comme données d'entrée au modèle de prévision des maladies. Les sources d'erreur les plus importantes des données radar qui pourraient avoir joué un rôle dans cette étude sont : l'atténuation, les échos du sol, la propagation anormale, le phénomène de la bande brillante et d'overshooting et la mauvaise adéquation de la relation Z-R. Nous estimons que malgré ces difficultés, l'utilisation opérationnelle du radar pour le contrôle des maladies cryptogamiques a un bel avenir et peut réduire le besoin de réseaux météorologiques denses.

4. L'un des principaux avantages de cette technologie est qu'elle permet de répondre aux besoins d'un grand nombre d'agriculteurs et de producteurs de blé qui ne disposent pas de stations météorologiques à proximité de leur exploitation agricole. En effet,

l'information peut être spécifique au site plutôt que d'utiliser les données de la station la plus proche.

5. Enfin, les données radar peuvent être utilisées pour alimenter à la fois les modèles de détermination de l'humectation et les modèles de prévision des risques épidémiques en contribuant à une meilleure localisation de l'infection et en fournissant ainsi une distribution spatiale des données.

➔ Concernant la détermination de la durée d'humectation :

1. Le modèle de la durée d'humectation SWEB a été sélectionné pour la simulation de la durée d'humectation dans des parcelles en culture du blé d'hiver. Les six critères sur lesquels a été basé notre choix du modèle sont : *i)* sa simplicité (les autres modèles sont complexes avec beaucoup de paramètres d'entrée au modèle), *ii)* son utilité (simule la durée d'humectation due à la pluie et à la rosée), *iii)* son adaptation à l'échelle de la feuille et du couvert, *iv)* son adaptation à la culture du blé, *v)* l'unité de la durée d'humectation (la fraction de la surface humide du couvert) et *vi)* la calibration et la validation des modèles dans des conditions contrôlées et en plein champ, ainsi que son application dans différentes zones géographiques et pour plusieurs cultures.

2. Le modèle SWEB a été évalué par des mesures de capteurs et par des données d'observation visuelles sur des épisodes pluvieux et des événements de rosée durant deux saisons culturales. Les périodes de début d'humectation ont été détectées sans difficulté par le modèle dans la plupart des cas. Par contre le modèle simule la fin de la rosée avant que cela ne soit observé. Notre travail apporte une contribution importante en matière de suivi des périodes d'humectation et d'infection par les observations visuelles et en termes de comparaisons statistiques entre données observées, mesurées et simulées.

3. L'impact des périodes d'humectation sur le développement de la septoriose sur différentes variétés du blé d'hiver a été étudié durant deux saisons culturales. Les périodes d'humectation simulées par le modèle SWEB ont été comparées aux périodes d'infection de *S. tritici* simulées par PROCULTURE et observées sur des parcelles d'essai. Les résultats obtenus ont souligné que l'utilisation d'un modèle d'humectation

et d'un modèle de prévision des risques épidémiques était très encourageante et que l'utilisation combinée des deux modèles présentera une alternative intéressante au système existant pour le contrôle des maladies en culture de blé d'hiver.

4. L'utilisation du radar météorologique à côté de nouvelles technologies comme les systèmes d'information géographique facilitera, comme nous l'avons montré, l'implémentation du modèle dans des systèmes régionaux de protection des plantes.

Enfin, pour terminer ces conclusions, nous proposons un système qui combine les trois outils largement décrits et étudiés dans notre thèse : *i)* le radar météorologique avec ses potentialités à fournir des données de précipitations avec une large distribution spatiale ; *ii)* un modèle pour la détermination de la durée d'humectation qui est capable de simuler les périodes d'humectation liées au développement de la maladie *iii)* et enfin un modèle de prévision épidémiologique qui détermine l'évolution de la maladie.

Au-delà des connaissances acquises, on peut également identifier des aspects qui n'ont pas été abordés dans le cadre de cette thèse mais qui sont susceptibles d'améliorer la compréhension générale du système "plante-maladie".
Une des perspectives de ce travail est d'analyser la variabilité de la durée d'humectation à différentes échelles spatio-temporelles pour l'amélioration des performances du modèle SWEB et pour aboutir à une meilleure explication des périodes d'infection de la septoriose et d'autres maladies cryptogamiques affectant la culture du blé d'hiver. Pour cela : *(i)* la variabilité spatio-temporelle de la durée d'humectation au sein d'un peuplement cultivé dans un environnement parcellaire homogène (état de surface des feuilles, nature de dépôt d'eau films/gouttes, architecture, densité, …) ; *(ii)* ou entre champs cultivés dans un paysage hétérogène (quantifier l'influence de paramètres géophysiques ou l'influence de l'hétérogénéité du paysage, par exemple à proximité d'un plan d'eau ou d'un rideau d'arbre) devra être étudiée. La prise en compte de la variabilité de la durée d'humectation est indispensable à la mise au point d'un système de prévision opérationnel.

La relation entre la durée d'humectation due à la pluie et la durée de précipitations estimée par le radar n'a pas été abordée dans ce travail et semble être une perspective de recherche intéressante surtout pour le début d'humectation.

Nous n'avons traité dans ce travail que les périodes d'humectation en relation avec l'épidémie de la septoriose. Une des perspectives qui apparaît comme un point-clé à aborder par la suite est d'étudier l'exigence en durée d'humectation pour d'autres maladies notamment les rouilles. En effet, la durée d'humectation, est la variable qui influence le plus la pénétration, la germination, la colonisation et la sporulation des rouilles du blé (Clifford et Harris, 1981; Hau et De Vallavieille-Pope, 1998; Sache, 2000). Une autre perspective est d'adapter le modèle SWEB à d'autres maladies comme que cela est réalisé pour la septoriose. L'utilisation en mode prévisionnel du modèle de la durée d'humectation en plein champ et sur différents sites et également sur base des données historiques pourrait être une autre perspective intéressante.

Un passage de la détermination de la durée d'humectation de l'échelle de la parcelle à celle du champ est à envisager également pour adapter le modèle SWEB à l'hétérogénéité des grandes surfaces cultivées. En effet, au G-D de Luxembourg on dispose d'une base de données d'observation de maladies du blé de plus de 10 ans. L'obtention des données d'entrée (précipitations) à partir des images radar va faciliter l'accès aux données et la spatialisation de la prévision. Les résultats de l'étude sur l'évaluation de la faisabilité d'utilisation des données radar pour améliorer la prévision de la septoriose par PROCULTURE à l'échelle du territoire (Mahtour et al, 2010) ont permis de proposer des solutions satisfaisantes pour améliorer de manière opérationnelle l'estimation du développement de cette maladies. Cette approche pourrait être envisagée de la même manière pour la simulation de la durée d'humectation (principalement due à la pluie) et pour la prévision d'autres maladies du blé d'hiver.

Pour la mesure de la durée d'humectation au parc météorologique, parmi les questions à résoudre, figurent celles de la définition d'un capteur de référence, ou tout au moins d'une méthode normalisée de mesure de la durée d'humectation afin de pouvoir comparer les résultats d'expérimentations sur différents sites et prescrire l'utilisation de systèmes d'avertissements phytosanitaires.

L'utilisation des images radar comme données d'entrée pour le modèle prévisionnel PROCULTURE a montré des résultats encourageants. Cependant cette approche n'a pas été vérifiée dans le cadre de cette étude pour le modèle SWEB. L'application du modèle sur une grande échelle pourrait être envisagée.

RÉFÉRENCES

Andrieu, H., Creutin, J. D., Delrieu, G., and Faure, D. (1997). Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part I: radar measurement interpretation. *Journal of Hydrology* **193**, 1-25.

Armstrong, R., Barthakur, N. N., and Norris, E. (1993). A comparative study of three leaf wetness sensors. *International Journal of Biometeorology* **37**, 7-10.

Berne, A., ten Heggeler, M., Uijlenhoet, R., Delobbe, L., Dierickx, P., and de Wit, M. (2005). A preliminary investigation of radar rainfall estimation in the Ardennes region and a first hydrological application for the Ourthe catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **5**, 267-274.

Calay, F., Coquillart, L., Lucas, C., Lemaire, D., Bodson, B., Moreau, J. M., and Maraite, H. (2002). Lessons from year 2001 *Mycosphaerella graminicola* epidemic on winter wheat in Belgium. Vol. 67, pp. 197-204, Meded Rijksuniv. Gent Fak. Landbouwkd Toegep. Biol. Wet.

Campbell, C. L., and Madden, L. V. (1990). Introduction to plant disease epidemiology. *Monitoring epidemics: environment. John Wiley, London*, 43-73.

Chen, R. S., and Mac Donald, B. A. (1996). Sexual reproduction plays a major role in the genetic structure of populations of the fungus *Mycosphaerella graminicola*. *Genetics* **142**, 1119-1127.

Chungu, C., Gilbert, J., and Townley-Smith, F. (2001). *Septoria tritici* blotch development as affected by temperature, duration of leaf wetness, inoculum concentration, and host. *Plant Disease* **85**, 430-435.

Clifford, B. C., and Harris, R. G. (1981). Controlled environment studies of the epidemic potential of *Puccinia recondita* f.sp. *tritici* on wheat in Britain. *Trans. Br. Mycol. Soc.* **77**, 351-358.

Creutin, J. D., Andrieu, H., and Faure, D. (1997). Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part II: radar measurement validation. *Journal of Hydrology* **193**, 26-44.

Dalla Marta, A., Gani, M., Cicogna, A., Dietrich, S., Orlandini, S., and Santorelli, E. (2007a). Transboundary system for grapevine downy mildew risk evaluation on a territorial scale (P. Rada project). *Bulletin OEPP* **37**, 290-294

Dalla Marta, A., Magarey, R. D., Martinelli, L., and Orlandini, S. (2007b). Leaf wetness duration in sunflower (*Helianthus annuus*): Analysis of observations, measurements and simulations. *European Journal of Agronomy* **26**, 310-316.

Dalla Marta, A., Magarey, R. D., and Orlandini, S. (2005). Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 84-95.

Delobbe, L. (2006). Estimation des précipitations à l'aide d'un radar météorologique. Royal Meteorological Institute, Brussels, Belgium (see also http://www.kmi.be/).

El Jarroudi, M. (2005). Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au G-D de Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision. *Thèse de Doctorat, Université de Liège*.

El Jarroudi, M., Delfosse, P., Maraite, H., Hoffmann, L., and Tychon, B. (2009). Assessing the accuracy of simulation model for *septoria* Leaf blotch disease progress on winter wheat. *Plant Disease* **93**, 983-992.

El Jarroudi, M., Delfosse, P., Pfister, L., Wagner, C., Vrancken, C., Schyns, V., Boland, E., Hoffmann, L., and Tychon, B. (2007). Elaboration d'un système intégré d'avertissement des différentes maladies cryptogamiques du blé au G-D de Luxembourg. Projet MACRY-Rapport intermédiaire 2007.

Eriksen, L., Shaw, M. W., and Ostergard, H. (2001). A model of the effect of pseudothetia on genetic recombination and epidemic development in populations of *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology* **91**, 240-248.

Gillespie, T. J., and Duan, R. X. (1987). A comparison of cylindrical and flat plate sensors. *Agric. For. Meteorol.* **40**, 61-70.

Groisman, P. Y., and Legates, D. R. (1994). The accuracy of United-States precipitation data. *Bulletin of the American Meteorological Society* **75**, 215-227.

Hagan, A. K., Bowen, K. L., Bauske, E. M., Getz, R. R., and Adams, S. D. (1999). Doppler radar precipitation estimates added to AU-Pnut advisory. *Phytopathology* **89**:S32. (Abstr.).

Hau, B., and De Vallavieille-Pope, C. (1998). Wind-dispersal diseases. *In* "In *The epidemiology of plant diseases*" (E. D. G.

J. K. A. Publishers, ed.), pp. 323-347. Ed., Dordrecht.

Henze, M., Beyer, M., Klink, H., and Verreet, J. A. (2007). Characterizing meteorological scenarios favorable for *Septoria tritici* infections in wheat and estimation of latent periods. *Plant Disease* **91**, 1445-1449.

Hubbard, K. G. (1994). Spatial variability of daily weather variables in the high-plains of the USA. *Agricultural and Forest Meteorology* **68**, 29-41.

Huber, L. (1992). Déterminisme et mesure de la durée d'humectation en vue de la protection des plantes. *Agronomie* **12**, 281-295.

Huber, L., and Gillespie, T. J. (1992). Modeling leaf wetness in relation to plant-disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology* **30**, 553-577.

Hunter, Coker, and Royle (1999). The teleomorph stage, *Mycosphaerella graminicola*, in epidemics of *Septoria tritici* blotch on winter wheat in the UK. *Plant Pathology* **48**, 51-57.

Junk, J., Görgen, K., El Jarroudi, M., Delfosse, P., Pfister, L., and Hoffmann, L. (2008). Operational application and improvements of the disease risk forecast model PROCULTURE to optimize fungicides spray for the *Septoria* leaf blotch disease in winter wheat in Luxembourg. *Adv. Sci. Res.* **2**, 57-60.

Kema, G. H. J., and Silfhout, C. H. (1996). Histology of the pathogenesis of *Mycospharella graminicola* in wheat. *Phytopathology* **86**, 777-786.

Kemerait, R. C., Brenneman, T. B., and Hoogenboom, G. (2003). Evaluation of Dopplerradar based AU-Pnut advisory for disease management in peanut. *Phytopathology*, 93:S44. (Abstr.).

Krajewski, W. F., Ciach, G. J., and Habib, E. (2003). An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. *Hydrological sciences journal* **48**, 151-162.

Lau, Y. F., Gleason, M. L., Zriba, N., Taylor, S. E., and Hinz, P. N. (2000). Effects of coating, deployment angle, and compass orientation on performance of electronic wetness sensors during dew periods. *Plant Disease* **84**, 192-197.

Legates, D. R., and Deliberty, T. L. (1993). Precipitation measurement biases in the United-States. *Water Resources Bulletin* **29**, 855-861.

Lemaire, E. D., Amand, O., and Maraite, H. (2003). Evolution of PROCULTURE, a disease risk simulation model for decision taking in *Mycosphaerella graminicola* control. *Pages 83 to 90 in: Global insights into the Septoria and Stagonospora diseases of cereals. Proceedings of the 6th International Symposium on Septoria and Stagonospora Diseases of Cereals. Eds. Kema, GHJ, Van Ginkel, M & Harrabi, M. December 8-12, 2003, Tunis, Tunisia.*

Madeira, A. C., Kim, K. S., Taylor, S. E., and Gleason, M. L. (2002). A simple cloud-based energy balance model to estimate dew. *Agricultural and Forest Meteorology* **111**, 53-63.

Magarey, R. D., Russo, J. M., and Seem, R. C. (2006a). Simulation of surface wetness with a water budget and energy balance approach. *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 373-381.

Magarey, R. D., Seem, R. C., and Russo, J. M. (2006b). Grape canopy surface wetness: Simulation versus visualization and measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 361-372.

Magarey, R. D., Weiss, A., Gillespie, T. J., Huber, L., and Seem, R. C. (2005). Estimating surface wetness on plants. In: Hatfield, J.L., Baker, J.M., Viney, M.K. (Eds.), Micrometeorological measurements in Agricultural systems. *American Society of Agronomy, Madison, WI.*

Mahtour, A., El Jarroudi, M., Delobbe, L., Hoffmann, L., Maraite, H., and Tychon, B. (2001). Site-specific *Septoria* leaf blotch risk assessment in winter wheat using weather-radar rainfall estimates. *Pant Disease*. 94:xx-yyy (*In press*).

Moreau, J. M., and Maraite, H. (1999). Integration of knowledge on wheat phenology and *Septoria tritici* epidemiology into a disease risk simulation model validated in Belgium. *Aspects of Applied Biology* **55**, 1-6.

Pedro, M. J. (1980). Relation of leaf surface wetness duration to meteorological parameters. In: Sentelhas PC, Gillespie TJ, Gleason ML, Monteiro JEBA, Helland ST (2004b) Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 59-72.

Pedro, M. J., and Gillespie, T. J. (1982a). Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agricultural Meteorology* **25**, 283-296.

Pedro, M. J., and Gillespie, T. J. (1982b). Estimating dew duration. II. Utilizing

standard weather station data. *Agricultural Meteorology* **25**, 297-310.

Petersen, G. W., Bell, J. C., McSweeney, K., Nielsen, G. A., and Robert, P. C. (1995). Geographic information systems in agronomy. *In* "Advances in Agronomy", Vol. 55, pp. 67-111.

Potratz, K. J., Gleason, M. L., Hockmuth, M. L., Parker, S. K., and Pearston, G. A. (1994). Testing the accuracy and precision of wetness sensors in a tomato field and turfgrass. *J. Iowa Acad. Sci.* **101**, 56-60.

Rizzo, D. M., Mouser, P. J., Whitney, D. H., Mark, C. D., Magarey, R. D., and Voinov, A. A. (2006). The comparison of four dynamic systems-based software packages: Translation and sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software* **21**, 1491-1502.

Rowlandson, T. L., Gillespie, T. J., and Ford, R. P. (2004). Use of precipitation duration data from weather radar in leaf wetness estimates for plant disease management. *26th conference on Agricultural and Forest Meteorology*.

Rowlandson, T. L., Gillespie, T. J., and Ford, R. P. (2009). Application of canadian weather radar data to plant disease management schemes in Southern Ontario. *Atmosphere Oceane* **47**, 154–159.

Sabatini, F., Dalla Marta, A., Orlandini, S., and Zanchi, C. A. (2005). Review of leaf wetness duration sensors. In: Dalla Marta, A., Magarey, R. D., And Orlandini, S. (2005). Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 84-95.

Sache, I. (2000). Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain. *Agronomie* **20**, 757-767.

Santos, E. A., Sentelhas, P. C., Pezzopane, J. E. M., Angelocci, L. R., and Monteiro, J. (2008). Spatial variability of leaf wetness duration in cotton, coffee and banana crop canopies. *Scientia Agricola* **65**, 18-25.

Sauvageot, H. (1994). Rainfall measurement by radar - a review. *Atmospheric Research* **35**, 27-54.

Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Gleason, M. L., Monteiro, J., and Helland, S. T. (2004a). Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 59-72.

Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., and Santos, E. A. (2007). Leaf wetness duration measurement: comparison of cylindrical and flat plate sensors under different field conditons. *International Journal of Biometeorology* **51**, 265-273.

Sentelhas, P. C., Monteiro, J., and Gillespie, T. J. (2004b). Electronic leaf wetness duration sensor: why it should be painted. *International Journal of Biometeorology* **48**, 202-205.

Shaw, M. W. (1990). Effects of temperature, leaf wetness and cultivar on the latent period on *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat. *Plant Pathology* **39**, 255-268.

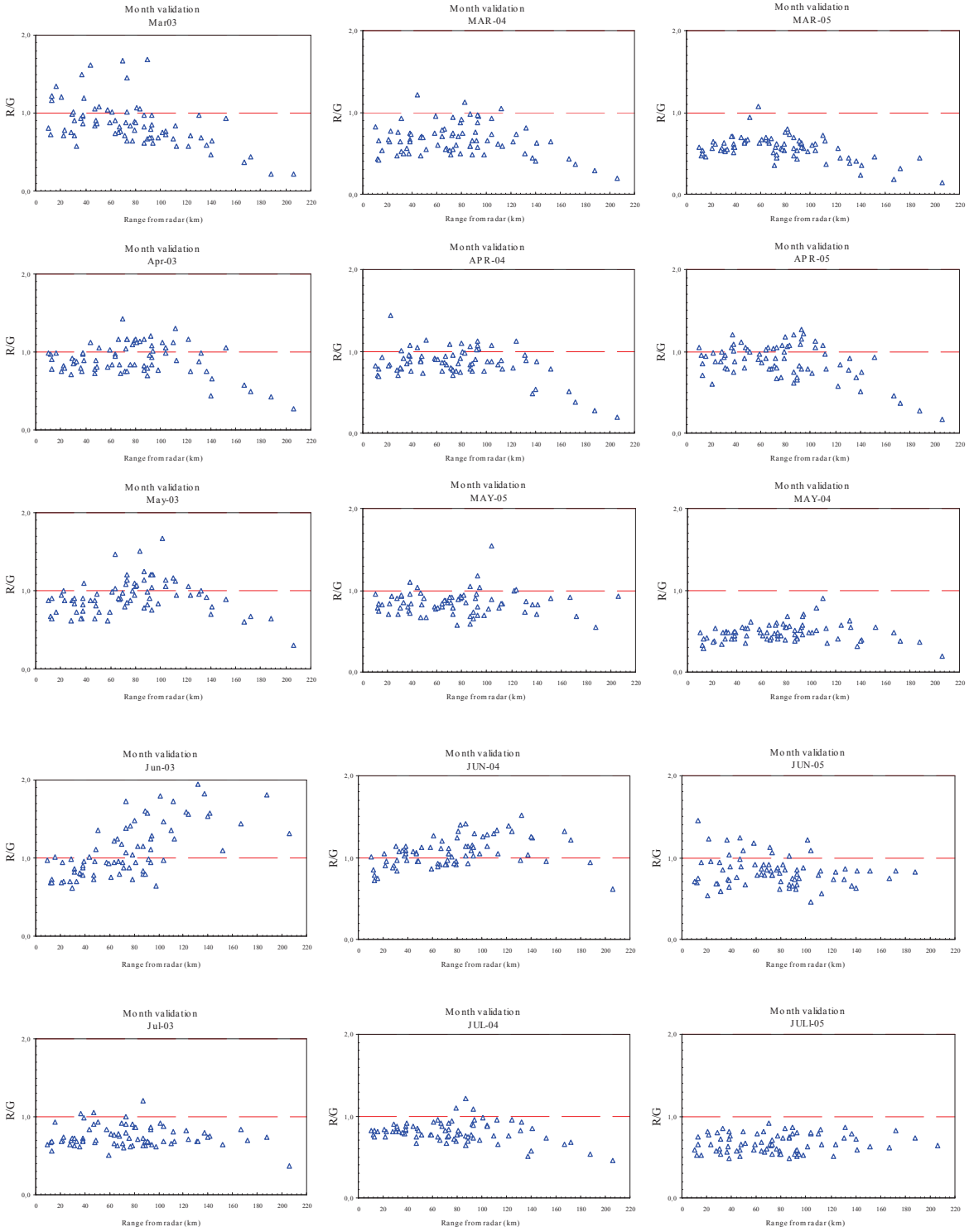
Ulbrich, C. W., and Lee, L. G. (1999). Rainfall measurement error by WSR-88D radars due to variations in Z-R law parameters and the radar constant. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **16**, 1017-1024.

Workneh, F., Narasimhan, B., Srinivasan, R., and Rush, C. A. (2005). Potential of radar-estimated rainfall for plant disease risk forecast. *Phytopathology* **95**, 25-27.

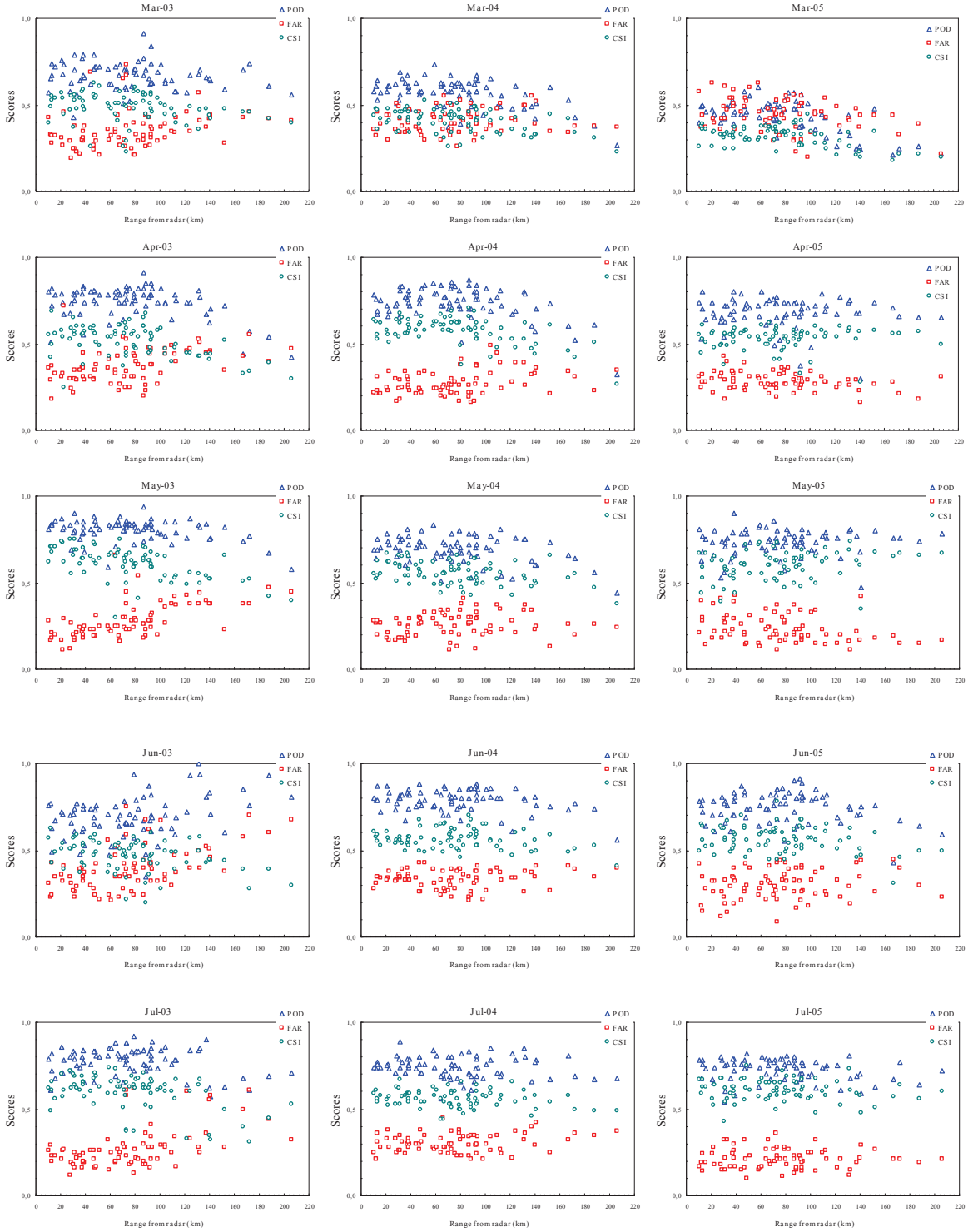
Workneh, F., Narasimhan, B., Srinivasan, R., and Rush, C. M. (2006). Assessment of regional site-specific *Sorghum ergot* severity potential using radar-rainfall measurement. *Plant Disease* **90**, 704-707.

Yule, I. J., Cain, P. J., Evans, E. J., and Venus, C. (1996). A spatial inventory approach to farm planning. *Computers and Electronics in Agriculture* **14**, 151-161.

ANNEXE A. Le rapport des cumuls mensuels (R/G) radar et des stations au sol en fonction de la distance pour les trois périodes de croissance testées (2003, 2004 and 2005).



ANNEXE B. Verification scores (POD, FAR and CSI) for each month and each station for in the three growing seasons (2003, 2004 and 2005)



ANNEXE C: Contingency tables for both radar and rain gauges for each month in the three growing seasons (2003. 2004 and 2005)

Contingency table for 01/03/2003 - 31/03/2003

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	87.77	2.05	0.32	0.19	0.06	0.05	0.11	0.06	0.10	90.72	**2.95**
]0-0.1]	2.20	0.46	0.24	0.15	0.07	0.06	0.13	0.04	0.02	3.38	
]0.1-0.2]	0.59	0.22	0.12	0.08	0.08	0.05	0.14	0.05	0.01	1.33	
]0.2-0.3]	0.21	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05	0.13	0.07	0.01	0.80	
]0.3-0.4]	0.09	0.08	0.07	0.06	0.03	0.03	0.11	0.10	0.01	0.58	
]0.4-0.5]	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.08	0.09	0.03	0.46	
]0.5-1]	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.30	0.30	0.15	1.28	
]1-2]	0.05	0.01	0.00	0.02	0.02	0.03	0.20	0.39	0.20	0.94	
>0.2	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.13	0.27	0.49	
Total	91.13	3.10	0.96	0.70	0.44	0.40	1.23	1.24	0.80	100	**5.93**
FA	**3.36**										Hits

Contingency table for 01/03-2004 - 31/03/2004

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	82.06	3.56	0.80	0.36	0.19	0.15	0.30	0.14	0.12	87.67	**5.61**
]0-0.1]	3.10	0.90	0.49	0.25	0.16	0.09	0.27	0.07	0.02	5.35	
]0.1-0.2]	0.91	0.35	0.16	0.20	0.13	0.09	0.22	0.10	0.01	2.17	
]0.2-0.3]	0.41	0.17	0.16	0.13	0.08	0.07	0.20	0.08	0.03	1.32	
]0.3-0.4]	0.23	0.08	0.05	0.04	0.04	0.06	0.16	0.08	0.02	0.77	
]0.4-0.5]	0.12	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04	0.12	0.08	0.03	0.56	
]0.5-1]	0.17	0.08	0.09	0.10	0.06	0.08	0.33	0.35	0.15	1.42	
]1-2]	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.17	0.24	0.13	0.64	
>0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.04	0.09	
Total	87.05	5.19	1.80	1.13	0.75	0.58	1.78	1.18	0.55	100	**7.34**
FA	**4.99**										Hits

Contingency table for 01/03/2005 - 31/03/2005

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	80.31	4.35	1.59	0.76	0.45	0.30	0.49	0.21	0.05	88.50	**8.19**
]0-0.1]	3.65	0.94	0.55	0.26	0.21	0.14	0.20	0.09	0.01	6.07	
]0.1-0.2]	0.84	0.30	0.23	0.17	0.13	0.07	0.19	0.05	0.01	1.99	
]0.2-0.3]	0.29	0.11	0.10	0.08	0.08	0.07	0.19	0.07	0.01	1.00	
]0.3-0.4]	0.14	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06	0.17	0.07	0.00	0.66	
]0.4-0.5]	0.07	0.02	0.05	0.05	0.03	0.04	0.11	0.07	0.00	0.45	
]0.5-1]	0.09	0.03	0.02	0.05	0.04	0.06	0.26	0.28	0.05	0.87	
]1-2]	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.09	0.16	0.07	0.36	
>0.2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.10	
Total	85.41	5.80	2.60	1.43	1.02	0.74	1.71	1.03	0.25	100	**6.40**
FA	**5.10**										Hits

Contingency table for 01/04/2003 - 30/042003

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	86.61	1.61	0.29	0.16	0.07	0.05	0.10	0.07	0.06	89.03	**2.42**
]0-0.1]	2.73	0.65	0.22	0.13	0.08	0.04	0.11	0.05	0.02	4.03	
]0.1-0.2]	0.58	0.24	0.17	0.11	0.07	0.05	0.09	0.05	0.01	1.38	
]0.2-0.3]	0.29	0.14	0.12	0.11	0.07	0.05	0.13	0.06	0.01	0.98	
]0.3-0.4]	0.13	0.09	0.10	0.07	0.05	0.05	0.10	0.05	0.01	0.65	
]0.4-0.5]	0.09	0.04	0.04	0.06	0.07	0.03	0.10	0.08	0.01	0.51	
]0.5-1]	0.12	0.07	0.09	0.10	0.11	0.13	0.51	0.33	0.08	1.52	
]1-2]	0.08	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.27	0.53	0.29	1.26	
>0.2	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.17	0.40	0.63	
Total	90.65	2.87	1.04	0.75	0.53	0.43	1.45	1.40	0.89	100	**6.93**
FA	**4.04**										

Contingency table for 01/04/2004 - 30/042004

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	81.87	2.35	0.56	0.21	0.18	0.09	0.16	0.11	0.09	85.62	**3.75**
]0-0.1]	2.65	1.06	0.48	0.30	0.18	0.12	0.20	0.04	0.00	5.03	
]0.1-0.2]	0.62	0.50	0.34	0.24	0.13	0.09	0.23	0.05	0.01	2.21	
]0.2-0.3]	0.19	0.24	0.25	0.17	0.13	0.09	0.24	0.08	0.01	1.38	
]0.3-0.4]	0.12	0.14	0.11	0.14	0.11	0.10	0.21	0.10	0.01	1.06	
]0.4-0.5]	0.05	0.06	0.09	0.07	0.09	0.07	0.25	0.11	0.02	0.81	
]0.5-1]	0.11	0.09	0.11	0.12	0.17	0.20	0.61	0.53	0.15	2.10	
]1-2]	0.09	0.01	0.02	0.02	0.04	0.05	0.24	0.41	0.28	1.15	
>0.2	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.07	0.17	0.31	0.64	
Total	85.77	4.45	1.96	1.27	1.02	0.81	2.21	1.62	0.89	100	**10.48**
FA	**3.91**										Hits

Contingency table for 01/04/2005 - 30/042005

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	79.75	3.52	0.65	0.36	0.16	0.09	0.25	0.12	0.04	84.95	**5.20**
]0-0.1]	2.80	1.29	0.57	0.23	0.15	0.09	0.20	0.07	0.01	5.41	
]0.1-0.2]	0.63	0.56	0.36	0.23	0.14	0.11	0.18	0.06	0.02	2.27	
]0.2-0.3]	0.28	0.24	0.24	0.21	0.18	0.13	0.26	0.07	0.01	1.62	
]0.3-0.4]	0.13	0.14	0.15	0.10	0.14	0.10	0.24	0.07	0.02	1.08	
]0.4-0.5]	0.08	0.06	0.07	0.05	0.08	0.08	0.26	0.08	0.02	0.76	
]0.5-1]	0.19	0.07	0.09	0.11	0.12	0.16	0.67	0.51	0.09	2.01	
]1-2]	0.09	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.31	0.53	0.25	1.30	
>0.2	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.17	0.32	0.60	
Total	84.00	5.89	2.13	1.32	0.99	0.82	2.41	1.68	0.77	100	**10.79**
FA	**4.25**										Hits

Contingency table for 01/05/2003 - 31/05/2003

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	78.87	2.03	0.29	0.19	0.12	0.08	0.14	0.15	0.13	82.00	**3.13**
]0-0.1]	3.22	1.25	0.36	0.22	0.11	0.07	0.17	0.05	0.01	5.46	
]0.1-0.2]	0.81	0.69	0.37	0.21	0.13	0.09	0.21	0.07	0.01	2.60	
]0.2-0.3]	0.32	0.36	0.30	0.23	0.11	0.10	0.24	0.10	0.01	1.77	
]0.3-0.4]	0.16	0.15	0.22	0.20	0.17	0.08	0.25	0.10	0.01	1.34	
]0.4-0.5]	0.12	0.07	0.11	0.12	0.09	0.07	0.21	0.11	0.03	0.92	
]0.5-1]	0.24	0.08	0.15	0.18	0.24	0.19	0.87	0.68	0.11	2.76	
]1-2]	0.17	0.01	0.03	0.03	0.03	0.07	0.38	0.89	0.54	2.16	
>0.2	0.07	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.05	0.24	0.61	1.00	
Total	83.97	4.65	1.84	1.38	1.00	0.77	2.52	2.40	1.46	100	**12.90**
FA	**5.10**										

Contingency table for 01/05/2004 - 31/05/2004

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	90.33	1.54	0.29	0.13	0.08	0.04	0.13	0.08	0.12	92.74	**2.41**
]0-0.1]	1.18	0.32	0.20	0.16	0.09	0.05	0.20	0.06	0.03	2.31	
]0.1-0.2]	0.30	0.15	0.12	0.10	0.09	0.07	0.21	0.10	0.04	1.18	
]0.2-0.3]	0.14	0.08	0.06	0.03	0.05	0.04	0.22	0.13	0.06	0.82	
]0.3-0.4]	0.07	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12	0.13	0.06	0.50	
]0.4-0.5]	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.06	0.13	0.06	0.39	
]0.5-1]	0.13	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.19	0.30	0.43	1.27	
]1-2]	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.11	0.10	0.26	0.60	
>0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.12	0.20	
Total	92.21	2.24	0.77	0.53	0.40	0.32	1.28	1.07	1.18	100	**5.38**
FA	**1.88**										Hits

Contingency table for 01/05/2005 - 31/05/2005

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	81.22	2.80	0.51	0.26	0.17	0.11	0.19	0.04	0.02	85.31	**4.09**
[0-0.1]	2.19	0.87	0.41	0.21	0.14	0.10	0.16	0.02	0.01	4.11	
]0.1-0.2]	0.62	0.49	0.31	0.20	0.18	0.11	0.18	0.08	0.00	2.16	
]0.2-0.3]	0.28	0.27	0.23	0.19	0.14	0.09	0.27	0.08	0.01	1.56	
]0.3-0.4]	0.10	0.15	0.16	0.12	0.13	0.09	0.25	0.07	0.01	1.08	
]0.4-0.5]	0.07	0.08	0.09	0.10	0.10	0.09	0.29	0.14	0.01	0.98	
]0.5-1]	0.12	0.09	0.08	0.17	0.17	0.16	0.81	0.71	0.18	2.48	
]1-2]	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.36	0.68	0.40	1.60	
>0.2	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.18	0.47	0.71	
Total	84.63	4.75	1.81	1.29	1.09	0.80	2.54	1.99	1.10	100	**11.28**
FA	**3.41**										Hits

Contingency table for 01/06/2003 - 30/06/2003

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	91.64	1.40	0.20	0.09	0.04	0.02	0.03	0.02	0.06	93.49	**1.85**
]0-0.1]	1.68	0.15	0.05	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	1.94	
]0.1-0.2]	0.43	0.13	0.06	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.68	
]0.2-0.3]	0.25	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.50	
]0.3-0.4]	0.08	0.07	0.04	0.04	0.04	0.01	0.03	0.01	0.00	0.31	
]0.4-0.5]	0.07	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.04	0.01	0.00	0.28	
]0.5-1]	0.11	0.07	0.08	0.09	0.10	0.06	0.22	0.14	0.02	0.87	
]1-2]	0.06	0.04	0.02	0.02	0.03	0.01	0.19	0.28	0.17	0.82	
>0.2	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.07	0.15	0.82	1.12	
Total	94.34	2.00	0.56	0.35	0.27	0.14	0.62	0.61	1.09	100	**3.81**
FA	**2.71**										Hits

Contingency table for 01/06/2004 - 30/06/2004

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	82.38	1.92	0.29	0.14	0.08	0.04	0.12	0.07	0.02	85.06	**2.68**
]0-0.1]	3.16	1.01	0.33	0.18	0.09	0.05	0.12	0.03	0.00	4.97	
]0.1-0.2]	0.82	0.59	0.27	0.13	0.08	0.06	0.13	0.06	0.01	2.15	
]0.2-0.3]	0.37	0.34	0.24	0.12	0.08	0.06	0.10	0.03	0.01	1.36	
]0.3-0.4]	0.19	0.12	0.17	0.12	0.10	0.06	0.13	0.06	0.01	0.95	
]0.4-0.5]	0.09	0.09	0.11	0.11	0.09	0.07	0.13	0.05	0.01	0.75	
]0.5-1]	0.20	0.12	0.15	0.18	0.22	0.18	0.68	0.35	0.08	2.16	
]1-2]	0.09	0.03	0.02	0.02	0.05	0.09	0.38	0.65	0.29	1.63	
>0.2	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.21	0.61	0.96	
Total	87.32	4.23	1.60	1.00	0.79	0.62	1.88	1.51	1.06	100	**10.00**
FA	**4.94**										Hits

Contingency table for 01/06/2005 - 30/06/2005

R\G	0	[0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	94.13	0.80	0.11	0.07	0.04	0.03	0.06	0.03	0.05	95.32	**1.18**
[0-0.1]	1.05	0.28	0.13	0.04	0.05	0.03	0.05	0.02	0.00	1.65	
]0.1-0.2]	0.20	0.13	0.07	0.05	0.03	0.01	0.05	0.02	0.00	0.56	
]0.2-0.3]	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0.02	0.06	0.02	0.00	0.37	
]0.3-0.4]	0.02	0.03	0.05	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.20	
]0.4-0.5]	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02	0.02	0.04	0.02	0.01	0.20	
]0.5-1]	0.04	0.01	0.02	0.03	0.06	0.04	0.20	0.14	0.02	0.55	
]1-2]	0.05	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.08	0.18	0.16	0.50	
>0.2	0.04	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.08	0.48	0.65	
Total	95.62	1.33	0.47	0.30	0.26	0.17	0.60	0.52	0.73	100	**3.19**
FA	**1.49**										Hits

Contingency table for 01/07/2003 - 31/07/2003

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	87.05	1.60	0.23	0.10	0.05	0.04	0.09	0.05	0.09	89.30	**2.26**
]0-0.1]	2.00	0.71	0.31	0.16	0.10	0.06	0.14	0.03	0.01	3.51	
]0.1-0.2]	0.44	0.32	0.19	0.12	0.10	0.05	0.14	0.07	0.01	1.45	
]0.2-0.3]	0.21	0.19	0.13	0.10	0.09	0.06	0.10	0.09	0.02	0.99	
]0.3-0.4]	0.07	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.13	0.07	0.02	0.65	
]0.4-0.5]	0.06	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05	0.14	0.08	0.03	0.57	
]0.5-1]	0.11	0.06	0.09	0.09	0.11	0.09	0.40	0.35	0.16	1.45	
]1-2]	0.06	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03	0.19	0.41	0.51	1.25	
>0.2	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.09	0.67	0.84	
Total	90.01	3.03	1.11	0.72	0.60	0.43	1.35	1.24	1.52	100	**7.73**
FA	**2.97**										Hits

Contingency table for 01/07/2004 - 31/07/2004

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	81.82	2.55	0.44	0.21	0.12	0.07	0.13	0.07	0.03	85.44	**3.62**
]0-0.1]	3.32	0.83	0.33	0.16	0.08	0.07	0.12	0.04	0.01	4.96	
]0.1-0.2]	0.57	0.50	0.30	0.15	0.11	0.06	0.14	0.05	0.01	1.88	
]0.2-0.3]	0.21	0.22	0.18	0.13	0.10	0.06	0.14	0.05	0.01	1.10	
]0.3-0.4]	0.09	0.10	0.12	0.11	0.08	0.07	0.13	0.07	0.01	0.77	
]0.4-0.5]	0.05	0.06	0.06	0.10	0.06	0.07	0.18	0.08	0.01	0.67	
]0.5-1]	0.10	0.08	0.09	0.13	0.16	0.15	0.64	0.48	0.13	1.95	
]1-2]	0.04	0.01	0.02	0.01	0.04	0.04	0.39	0.64	0.52	1.71	
>0.2	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.21	1.22	1.52	
Total	86.23	4.34	1.55	1.00	0.74	0.59	1.91	1.69	1.94	100	**10.15**
FA	**4.41**										Hits

Contingency table for 01/07/2005 - 31/07/2005

R\G	0	]0-0.1]	]0.1-0.2]	]0.2-0.3]	]0.3-0.4]	]0.4-0.5]	]0.5-1]	]1-2]	>0.2	Total	Misses
0	80.78	2.91	0.49	0.33	0.20	0.11	0.24	0.09	0.07	85.22	**4.44**
]0-0.1]	2.15	0.94	0.47	0.34	0.21	0.16	0.40	0.09	0.01	4.77	
]0.1-0.2]	0.45	0.42	0.27	0.18	0.13	0.11	0.33	0.14	0.02	2.06	
]0.2-0.3]	0.19	0.22	0.20	0.14	0.13	0.07	0.25	0.15	0.03	1.38	
]0.3-0.4]	0.09	0.08	0.11	0.08	0.07	0.06	0.18	0.15	0.03	0.86	
]0.4-0.5]	0.05	0.04	0.05	0.08	0.09	0.05	0.23	0.17	0.05	0.80	
]0.5-1]	0.09	0.05	0.09	0.11	0.11	0.16	0.64	0.57	0.22	2.05	
]1-2]	0.05	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.22	0.60	0.64	1.62	
>0.2	0.05	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.10	1.03	1.24	
Total	83.89	4.71	1.69	1.29	0.98	0.75	2.53	2.07	2.10	100	**11.67**
FA	**3.11**										Hits

ANNEXE D. Basic driving equations used in the leaf wetness duration simulated by SWEB model (Magarey et al., 2006)

$$SW = 1, \quad \text{for } W_{ind} > W_{th}, \tag{1}$$

$$SW = 0, \quad \text{for } W_{ind} < W_{th} \tag{2}$$

Where SW = surface wetness, W_{ind} : index of fraction of canopy wet surface area, and W_{th} : surface wetness threshold.

$$W_{ind} = \left(\frac{S}{C}\right)^{0.67} \tag{3}$$

Where S : canopy water storage (cm) and C : maximum canopy water storage (cm).

$$W = W_{ind} \times W_{max} \tag{4}$$

Where W : actual fraction of wet area to total canopy surface area, W_{max} : maximum fraction of canopy allowed as wet surface area.

$$W_{max} = pW_f + (1 - p)W_d \tag{5}$$

Where p : fraction of wettable leaves to total leaves in canopy, W_f : average fraction of wet area to total area of wettable leaves, (1 - p) = fraction of non-wettable leaves to total leaves in canopy, and W_d : average fraction of wet area to total area of non-wettable leaves.

$$C = LAI \times C_l \tag{6}$$

Where C : maximum water storage for a canopy (cm), LAI : leaf area index, and C_l : maximum water storage for an average leaf (cm).

$$S = (I + D_p - E), \quad \text{for } 0 < S < C \tag{7}$$

Where S : water storage (cm), I = intercepted rain (cm), D_p : potential condensation of dew (cm), and E : evaporation (cm).

$$I = (1 - \exp(-0.5\mathrm{LAI}))P \tag{8}$$

Where LAI : leaf area index and P : precipitation as rain (cm).

$$E_p = \frac{\Delta}{\lambda(\Delta + \delta)}\left\{R_n + \rho C_p\left(\frac{h}{\Delta}\right)(e_a^* - e_a)\right\} \tag{9}$$

where E_p : potential latent heat flux density (evaporation) (cm min^{-1}), Δ = slope of the saturation vapour pressure curve (mbar C^{-1}), λ : latent heat of vaporization (J g^{-1}), δ : psychrometric constant (mbar C^{-1}), R_n : net radiant flux density (J $min^{-1}cm^{-2}$), ρ : density of air (g cm^{-3}), C_p : specific heat of air (J g^{-1} C^{-1}), h : transfer coefficient for heat and vapour from the surface to the atmosphere (cm min^{-1}), e_a : water vapor pressure of the atmosphere (mbar), and e^*_a : saturated water vapor pressure of the atmosphere (mbar).

$$E_p = \frac{\Delta}{\lambda(\Delta + \delta)}\left\{\rho C_p\left(\frac{h}{\Delta}\right)(e_a^* - e_a)\right\} \tag{10}$$

$$E = E_p W \tag{11}$$

$$D_p = \frac{\Delta}{\lambda(\Delta + \delta)} 0.5 R_{nc} \tag{12}$$

Where D_p : the potential condensation of dew (cm min^{-1}) and R_{nc} : canopy net radiant flux density (J min^{-1} cm^{-2}).

$$h = cU_c^{0.5} \tag{13}$$

Where h : transfer coefficient (cm min^{-1}), c : shape scale constant of an object ($cm^{0.5}$ $min^{-0.5}$), and U_c : canopy wind speed (cm min^{-1}).

$$c = Wc_f + (1 - W)c_d \tag{14}$$

Where c : shape scale variable ($cm^{0.5}$ $min^{-0.5}$), W : actual fraction of canopy wet surface area in previous time step, c_f : shape scale constant for film ($cm^{0.5}min^{-0.5}$), and c_d : shape scale constant for drops ($cm^{0.5}$ $min^{-0.5}$).

$$U_c = U_Z \left(\frac{\ln[(Z_c - D_Z)/Z_0]}{\ln[(Z - D_Z)/Z_0]} \right) \left[1 + \alpha \left(\frac{1 - Z_c}{Z} \right) \right]^{-2} \quad (15)$$

Where U_c : wind speed at average height of the canopy (cm min_1), Z_c : height of canopy (cm), U_Z = wind speed (cm min^{-1}), at reference height, Z, D_Z : zero plane displacement (assumed to be $2/3Z_c$) (cm), Z_0 : roughness length (assumed to be 1/10Z) (cm), Z : reference height (cm), and a = 1.3.

ANNEXE E. Calculation steps in the SWEB model (Magarey, 2006).

Order	Equation	Calculation	Inputs
1	(6)	Max water storage (C)	LAI, C_l
2	(5)	Max wet area (W_{max})	W_d, W_f, p
3	(8)	Interception (I)	LAI, P
4	(12)	Potential condensation (D_p)	R_{nc}, T_c
5	(7)	Initial canopy water budget (S_i)	C, I, D_p, S_{t-1}
6	(3) and (4)	Wet area (W_{ind}, W)	S_i, C, W_{max}
7	(15)	Canopy wind speed (U_c)	U_Z, Z_c
8	(13) and (14)	Transfer (h, c)	U_c, W, c_d, c_f
9	(10) and (11)	Evaporation (E)	T_c, RH_c, h, W
10	(7)	Canopy water budget (S)	S_i, E, C
11	(3)	Canopy wet surface area (W_{ind})	S, C
12	(1) and (2)	Surface wetness (SW)	W_{ind}, W_{th}

ANNEXE F. Main inputs, variables and constants used in the SWEB model (Magarey, 2006).

Symbol	Variable/constant
C	Max water storage, C (cm)
C_l	Max water storage per leaf area (cm)
c	Shape scale variable ($cm^{0.5}$ $min^{-0.5}$)
c_d	Shape scale constant for drops ($cm^{0.5}$ $min^{-0.5}$)
c_f	Shape scale constant for film ($cm^{0.5}$ $min^{-0.5}$)
D_p	Potential condensation (cm min^{-1})
E	Evaporation (cm min^{-1})
h	Transfer coefficient (cm min^{-1})
I	Interception (cm)
LAI	Leaf area index
P	Precipitation (cm)
p	Fraction of wettable leaves to total leaves in canopy
RH_c	Canopy relative humidity (%)
R_{nc}	Canopy net radiant flux (J min^{-1} cm^{-2})
S	Canopy water budget (cm)
S_i	Initial canopy water budget (cm)
SW	Surface wetness
T_c	Canopy air temperature (°C)
U_c	Canopy wind speed (cm min^{-1})
U_Z	Wind speed at reference height (cm min^{-1})
W	Actual fraction of wet area to total canopy surface area
W_d	Average fraction of wet area to total area of non-wettable leaves.
W_f	Average fraction of wet area to total area of wettable leaves.
W_{ind}	Index of fraction of canopy wet surface area
W_{max}	Max wet area (W_{max})
W_{th}	Wetness threshold
Z_c	Height of canopy (cm)

ANNEXE G. The process of painting the leaf wetness sensor 237 Campbell Scientific Model (*Sentelhas - personal communication)*.

The process of painting is very simple and must be done following the steps below:

a) Buy the cheapest paint in the market - white latex paint

b) Paint the sensor with 2 or 3 covers. Dry-off is required after each painting. You can use an oven at 70 degrees Celsius to dry-off the sensor after painting.

c) after the 3 covers (when the sensor cool down), immerse the sensor inside water for at least 30 min and after that put it again in the oven for 12h at 70 degrees. This is to deactivate hygroscopic substances of the painting.

d) Repeat c 3 times.

ANNEXE H. Signification du stade phénologique de Zadoks (Zadoks et al., 1974).

Stade	Signification
GS10	Levée
GS21	Début Tallage
GS29	Fin Tallage
GS30	Pseudo-redressement de la tige.
GS31	1 nœud
GS32	2 nœuds
GS37	Apparition de la dernière feuille.
GS39	Ligule visible
GS40 à GS49	Gonflement
GS50 à GS59	Epiaison
GS60 à GS69	Floraison
GS70 à GS79	Maturité laiteuse
GS80 à GS89	Maturité pâteuse
GS90 à GS94	Maturité Complète

ANNEXE K. Comparison between leaf wetness occurrences visually observed (Obs.), simulated with SWEB (Sim.) and reordered by three sensors (Sen1, Sen2 and Sen3) for wet and dry hour event during two cropping seasons 2006 and 2007.

Year		Obs. vs Sim.				Sim. vs Sen1				Sim. vs Sen2				Sim. vs Sen3			
		POD	FAR	PNE	BIAS	POD	FAR	PNE	BIAS	POD	FAR	CSI	PNE	POD	FAR	PNE	BIAS
2006	May	80,30	7,02	0,92	0,86	82,89	4,55	0,95	0,87	83,08	0,00	83,08	1,00	78,79	0,00	1,00	0,79
	June	56,91	5,41	0,96	0,60	61,88	2,94	0,98	0,64	61,62	8,80	58,16	0,93	56,49	11,22	0,91	0,64
	July	70,00	6,67	0,91	0,75	62,94	4,26	0,97	0,66	61,87	4,44	60,14	0,97	66,67	9,89	0,94	0,74
	All	69,07	6,36	0,93	0,74	69,24	3,91	0,97	0,72	68,86	4,41	67,13	0,97	67,32	7,04	0,95	0,72
2007	April	78,26	0,00	1,00	0,78	80,95	11,69	0,90	0,92	83,10	9,23	76,62	0,92	81,82	6,49	0,94	0,88
	May	65,22	0,00	1,00	0,65	73,29	1,59	0,98	0,74	76,68	2,63	75,13	0,97	71,28	2,37	0,97	0,73
	June	71,43	29,49	0,36	1,01	84,17	6,91	0,87	0,90	83,41	7,28	78,28	0,87	84,88	4,40	0,91	0,89
	July	+	+	+	+	74,31	3,60	0,95	0,77	76,76	1,80	75,69	0,98	75,54	5,41	0,93	0,80
	All	71,64	9,83	0,79	0,82	78,18	5,95	0,93	0,83	79,99	5,24	76,43	0,94	78,38	4,67	0,94	0,82

ANNEXE. K. Comparison between leaf wetness occurrences visually observed (Obs.), simulated with SWEB (Sim.) and reordered by three sensors (Sen1, Sen2 and Sen3) for start of wetness event during two cropping seasons 2006 and 2007.

Year		Obs. vs Sim.				Sim. vs Sen1				Sim. vs Sen2				Sim. vs Sen3			
		POD	FAR	PNE	BIAS	POD	FAR	PNE	BIAS	POD	FAR	PNE	CSI	POD	FAR	PNE	BIAS
2006	May	0,63	0,17	0,50	0,75	0,40	0,00	1,00	0,40	0,45	0,00	1,00	0,45	0,56	0,00	1,00	0,56
	June	0,77	0,23	0,40	1,00	0,52	0,13	0,33	0,59	0,56	0,36	0,09	0,88	0,44	0,45	0,00	0,81
	July	0,80	0,20	0,00	1,00	0,74	0,13	0,50	0,85	0,77	0,17	0,33	0,92	0,74	0,39	0,36	1,21
	All	0,73	0,20	0,30	0,92	0,55	0,09	0,61	0,61	0,60	0,17	0,47	0,75	0,58	0,28	0,45	0,86
2007	April	0,38	0,00	0,00	0,38	0,56	0,44	0,20	1,00	0,80	0,50	0,33	1,60	0,67	0,33	0,25	1,00
	May	1,00	0,13	0,75	1,14	0,71	0,14	0,20	0,82	0,63	0,21	0,20	0,79	0,67	0,46	0,08	1,24
	June	0,64	0,00	0,00	0,64	0,61	0,06	0,00	0,64	0,58	0,06	0,00	0,62	0,70	0,06	0,00	0,74
	July	+	+	+	+	0,78	0,14	0,25	0,91	0,83	0,05	0,67	0,88	0,80	0,24	0,55	1,05
	All	0,67	0,04	0,25	0,72	0,66	0,20	0,16	0,84	0,71	0,21	0,30	0,97	0,71	0,27	0,22	1,01

ANNEXE. K. Comparison between leaf wetness occurrences visually observed (Obs.), simulated with SWEB (Sim.) and reordered by three sensors (Sen1, Sen2 and Sen3) for end of wetness event during two cropping seasons 2006 and 2007.

Year		Obs. vs Sim.				Sim. vs Sen1				Sim. vs Sen2				Sim. vs Sen3			
		POD	FAR	PNE	BIAS	POD	FAR	PNE	BIAS	POD	FAR	PNE	BIAS	POD	FAR	PNE	BIAS
2006	May	0,11	0,50	0,00	0,22	0,36	0,43	1,00	0,64	0,38	0,40	0,60	0,63	0,44	0,20	0,50	0,56
	June	0,19	0,00	1,00	0,19	0,29	0,00	1,00	0,29	0,28	0,00	1,00	0,28	0,28	0,00	1,00	0,28
	July	0,20	0,00	1,00	0,20	0,29	0,00	1,00	0,29	0,28	0,00	1,00	0,28	0,28	0,00	1,00	0,28
	All	0,17	0,17	0,67	0,20	0,32	0,14	1,00	0,41	0,31	0,13	0,87	0,39	0,33	0,07	0,83	0,37
2007	April	0,40	0,00	1,00	0,40	0,43	0,33	0,44	0,65	0,52	0,13	0,71	0,60	0,48	0,13	0,60	0,56
	May	0,22	0,00	1,00	0,22	0,26	0,00	1,00	0,26	0,28	0,00	1,00	0,28	0,25	0,00	1,00	0,25
	June	0,44	0,26	0,17	0,59	0,41	0,39	0,33	0,67	0,41	0,39	0,33	0,67	0,43	0,22	0,58	0,55
	July	+	+	+	+	0,29	0,00	1,00	0,29	0,32	0,00	1,00	0,32	0,32	0,00	1,00	0,32
	All	0,35	0,09	0,72	0,41	0,35	0,18	0,69	0,47	0,38	0,13	0,76	0,47	0,37	0,09	0,80	0,42

ANNEXE L. La densité de semis calculée pour chaque variété utilisée dans cette étude.

Variété	Sensibilité à la septoriose	PMG* (g)	Densité de semis (Kg/ha)	g/1.5m²
Achat	+	46.50	157.2	23,6
Akteur	+++	49.80	168.59	25,3
Flair	+	41.50	140.4	21,1
Urban	++	47.70	161.4	24,2
Rosario	+	-	-	-
Hattrick	+	-	-	-

* poids de mille grains
- pas de données

ANNEXE M. Les différents points de transition rapportés dans la littérature pour le capteur Campbell modèle 237.

Author	Wet/Dry threshold* (U)
Chtioui et al., 1999	200kΩ
Chtioui et al., 1999	900kΩ
Gleason et al., 1994	900kΩ
Kim et al., 2002 Sentelhas et al., 2004 Sentelhas et al., 2005 Santos et al., 2008	9000 kΩ painted sensor
Kim et al. 2005	1000 kΩ
Madeira et al. 2002	1000 kΩ
Magarey et al., 2006	<150 KΩ for unpainted sensor

*The transition from wet to dry is determined by either calibration or by user or manufacturer definition. Users of the common unpainted Campbell sensor typically program the Campbell-recommended transition threshold of <150 kohms. A transition threshold <6999 kohms has been suggested for painted Campbell sensors (Potratz et al., 1994). For those loggers that report voltage measurements, a threshold of 10% full span (maximum voltage) can be used as a representative transition value.

ANNEXE N. Résultats de l'analyse de variance de la quantité d'eau libre retenue par la surface foliaire (F1, F2 et F3) en fonction de différentes sources d'humectation (rosée, pluie et humectation artificielle).

Source des variations	*Somme des carrés*	*Degré de liberté*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Probabilité*	*Valeur critique pour F*
Entre Groupes	0,001230984	2	0,000615492	28,18332623	2,5E-12	3,013716893
A l'intérieur des groupes	0,01094127	501	2,18389E-05			
Total	0,012172253	503				

Groupes : rosée, pluie et humectation artificielle

Summary – Weather-Radar Rainfall Measurement and Simulated Surface Wetness Duration for Septoria Leaf Blotch Risk Assessment. *The persistence of free moisture on leaves, mainly as a result of precipitation in the form of rainfall or dew, plays a major role during the process of plant infection by most fungal pathogens. Acquiring rainfall and leaf moisture information is needed for accurate and reliable disease prediction and management. The objective of this research is to contribute to improve forecasting Septoria leaf blotch and other fungal pathogens on winter wheat in Belgium and Luxembourg.*

In the first part of this work, the potential of weather-radar rainfall estimates for plant disease forecasting is discussed. At first step, we focused on assessing the accuracy and limitations of radar-derived precipitation estimates, compared with rain-gauge data. In a second step, the Septoria leaf blotch prediction model PROCULTURE was used to assess the impact on the simulated infection rate of using, as input data, rainfall estimated by radar instead of rain gauge measurements. When comparing infection events simulated by PROCULTURE using radar-derived estimates and reference rain gauge measurements, the probability of detection (POD) of infection events was high (0.83 on average), and the false alarm ratio (FAR) of infection events was not negligible (0.24 on average). FAR decreased to 0 and POD increased (0.85 on average) for most stations, when the model outputs for both datasets were compared against visual observations of Septoria leaf blotch symptoms. Analysis of 148 infection events observed over three years at four locations showed no significant difference in the number of simulated infection events using either radar assessments or gauge measurements. This suggests that, for a given location, radar estimates are just as reliable for predicting infection events as rain gauges. As radar is able to estimate rainfall occurrence over a continuous space, unlike weather station networks that do observations at only a limited number of points, it has the great advantage of being able to predict the risk of infection at each point within an area of interest with an accuracy equivalent to rain gauge observations. This gives radar an important advantage that could significantly improve existing warning systems.
In the second part, a physical model based on the energy balance, known as the Surface Wetness Energy Balance (SWEB), was applied for the simulation of Surface Wetness Duration (SWD) on winter wheat canopy. The model, developed in the United States on grapes canopies, was adapted for the winter wheat cultivars and was applied for use with agrometeorological data easily available from standard weather stations and weather-radar rainfall estimates. The SWEB model simulates surface wetness duration for both dew and rain events. The model was validated with data measured by sensors and with visual observations of SWD conducted in experimental plots during two cropping seasons in 2006 and 2007. The wetness was observed visually by assessing the presence or absence of surface water on leaves. Based on the results, the SWEB model appeared to underestimate surface wetness duration and especially for the dry-off events when compared statistically to visual observations. The error, on average, is generally less than 90 minutes.

In order to establish a relationship between the surface wetness periods and Septoria leaf blotch development risk on the top three leaves, the SWEB model SWD outputs were compared with the number of hours of high probability of infection simulated by PROCULTURE as well as with visual plant diseases observations. A minimal surface wetness duration of favourable infection conditions for Septoria tritici was established.
It is now required to develop an operational system that would integrate weather radar, surface wetness duration and foliar epidemic model. In this work, we have analyzed the advantages and limitations of the radar system as input to models and its ability for spatial interpolation of rainfall. We also tested the model for the determination of surface wetness periods required for Septoria Leaf Blotch Risk development. The proposed approach could be integrated in the existing system.

Finally this approach shows once more the "happy marriage" between agrometeorology and plant disease management.

Keywords: *Weather-radar data; Rainfall; Septoria tritici; Forecasting system; Winter wheat; Epidemiological model; Surface wetness duration; Spatialization.*

RÉSUMÉ

L'humectation *des surfaces végétales, due principalement aux précipitations sous forme de* ***pluie*** *ou de* ***rosée****, joue un rôle déterminant lors de la phase de contamination des plantes par de nombreux* ***agents phytopathogènes****. La connaissance de la pluie et de la rosée constitue un élément fondamental pour l'étude et la compréhension du fonctionnement des modèles de simulation des épidémies et des* ***systèmes d'avertissements*** *agricoles. L'objectif de cette recherche est de contribuer à l'amélioration du système d'avertissement des principales* ***maladies cryptogamiques*** *affectant le* ***blé d'hiver*** *au sud de Belgique et au G-D de Luxembourg.*

Notre démarche a consisté, dans un premier temps à évaluer les potentialités du ***radar météorologique*** *de Wideumont. Nous avons décrit son fonctionnement général ainsi que son principe de mesure et nous avons détaillé les différentes sources d'erreur qui affectent les estimations de précipitations dérivées des observations radar. Les mesures radar sont moins précises que les mesures de précipitations par des pluviomètres. Néanmoins, le radar permet d'observer en temps réel les précipitations sur un large domaine avec une très bonne résolution spatiale et temporelle. La comparaison quantitative et qualitative des précipitations mesurées au sol avec celles estimées par le radar a été faite sur une période de trois ans (2003, 2004 et 2005). Les résultats de la validation des cumuls mensuels font apparaître que le radar a tendance à sous-estimer les précipitations. L'erreur calculée pour l'ensemble des stations varie entre -50% et +12%. La validation qualitative du radar a été réalisée sur des occurrences de cumuls horaires. Les indices calculés à partir des tables de contingence donnent des valeurs de POD (Probability Of Detection) entre 0.44 et 0.80 durant la période étudiée.*

L'impact des estimations radar sur les périodes d'infection de ***Septoria tritici*** *simulées par* ***PROCULTURE*** *a été évalué durant trois saisons culturales (2003, 2004 et 2005) par comparaison entre les données de sortie du modèle (alimenté par des estimations radar de précipitations horaires) et les estimations visuelles du développement des symptômes de la maladie sur les trois dernières feuilles. Les outputs de PROCULTURE via les données radar ont montré un grand accord entre la simulation et l'observation. Le radar météorologique devrait dès lors être bénéfique pour des régions où le réseau des pluviomètres est inexistant (ou moins dense) et où l'incidence de la septoriose est importante.*

Dans un deuxième temps, sur base d'une recherche bibliographique, un modèle d'humectation a été choisi. Le modèle sélectionné, appelé SWEB, se base sur le bilan énergétique et le bilan hydrique. Il simule la durée d'humectation due à la pluie et à la rosée sur l'ensemble du ***couvert végétal*** *à partir des données issues des stations agrométéorologiques. Le modèle a été ensuite testé et validé sur différentes variétés de blé d'hiver. Les données de sortie du modèle ont été comparées statistiquement aux mesures des capteurs (préalablement calibrés) et aux données d'observation obtenues sur des parcelles expérimentales et au champ durant les saisons culturales 2006 et 2007. Sur base des résultats obtenus, le modèle SWEB semble sous-estimer la durée d'humectation et plus particulièrement pour les événements de la fin d'humectation (dryoff). L'erreur moyenne en général est inférieure à 90 minutes.*

Dans un troisième temps, afin d'obtenir une relation entre les périodes d'humectation et le développement de la septoriose sur les trois dernières feuilles, les périodes d'humectation simulées par SWEB ont été comparées d'une part aux périodes d'infection de Septoria tritici simulées par PROCULTURE et d'autre part aux estimations visuelles. Le modèle de la durée d'humectation simule avec succès des périodes d'humectations, dues à la fois à la rosée et à la pluie, qui ont déclenché l'infection de la septoriose observée sur des parcelles expérimentales. Une durée minimale d'humectation favorable à l'infection des feuilles de blé par Septoria tritici a été déterminée.

Il est donc désormais nécessaire d'élaborer un système opérationnel intégrant le radar météorologique, le modèle de la durée d'humectation et le modèle épidémiologique. Notre travail a permis d'acquérir via l'analyse des données agrométéorologiques et des données phytopathologiques, les connaissances nécessaires à l'élaboration d'un tel système et de participer ainsi à l'amélioration des modèles d'avertissements existants. En effet, nous avons analysé les avantages et les limites du système radar comme données d'entrée aux modèles et son aptitude dans la spatialisation des données. Nous avons également testé le modèle d'humectation pour la détermination des périodes d'infection nécessaires au développement de la septoriose.

Dans une perspective d'une meilleure opérationnalisation du système, l'approche envisagée pourrait facilement être intégrée dans le système existant pour la simulation d'autres maladies comme les rouilles, l'oïdium et la fusariose à l'échelle régionale.

En définitive, ce travail aura prouvé une fois de plus l'intérêt du "mariage" entre l'agrométéorologie et la phytopathologie.

Mots-clés : *Radar météorologique, Précipitations, Durée d'humectation, Blé d'hiver, Septoria tritici, Système d'avertissement, Spatialisation.*