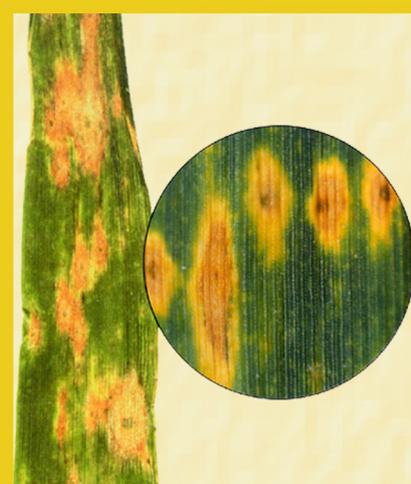
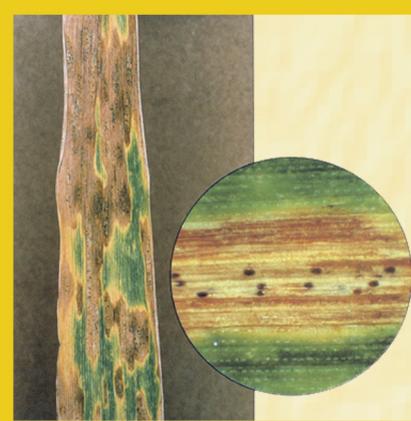


**Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales  
maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver  
au Grand-Duché de Luxembourg : Calibration et validation  
d'un modèle de prévision**

**Thèse présentée en vue de l'obtention  
du grade de Docteur en Environnement  
par Moussa EL JARROUDI**

**Jury**

<b>Pr L. Hoffmann,</b>	Centre de Recherche Publique-Gabriel Lippmann (Grand-Duché de Luxembourg)
<b>Pr H. Maraite,</b>	Université Catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve, Belgique)
<b>Dr J-M. Moreau,</b>	Station de Phytopharmacie (CRA de Gembloux, Belgique)
<b>Pr J. Nicolas,</b>	Université de Liège (Arlon, Belgique)
<b>Pr S. Porter,</b>	University of Idaho (USA)
<b>Dr B. Tychon,</b>	Université de Liège (Arlon, Belgique)



---

## SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

### INTRODUCTION GENERALE

#### **PARTIE I**

CHAPITRE I :	Méthodologie de choix des sites d'essais .....	I-1
CHAPITRE II :	Méthodologie de mesure .....	II-1
CHAPITRE III :	Epidémiologie de la septoriose des feuilles du blé au Grand-Duché de Luxembourg entre 1999 à 2003 .....	III-1
CHAPITRE IV :	Epidémiologie de la rouille brune au GD de Luxembourg .....	IV-1
CHAPITRE V :	Epidémiologie de la rouille jaune au GD de Luxembourg .....	V-1
CHAPITRE VI :	Epidémiologie de l'helminthosporiose au GD de Luxembourg .....	VI-1
CHAPITRE VII :	Epidémiologie de l'oïdium au GD de Luxembourg .....	VII-1
CHAPITRE VIII :	Etude de l'effet de la fumure azotée sur certaines maladies cryptogamiques foliaires et sur le rendement .....	VIII-1

#### **PARTIE II**

CHAPITRE I :	Simulation de la croissance des feuilles en fonction de la somme de degrés jours .....	I-1
CHAPITRE II :	Simulation de la septoriose des feuilles du blé d'hiver au GD de Luxembourg .....	II-1
CHAPITRE III :	Evaluation des paramètres météorologiques qui favorisent l'épidémie de la rouille jaune au GD de Luxembourg par l'utilisation du modèle de DENNIS (1988) .....	III-1
CHAPITRE IV :	Simulation de la rouille jaune du blé d'hiver au GD de Luxembourg. Calibration et validation .....	IV-1
CHAPITRE V :	Analyse conceptuelle des paramètres météorologiques influençant la rouille brune au GD de Luxembourg .....	V-1
CHAPITRE VI :	Analyse conceptuelle des composantes microclimatiques .....	VI-1

### CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

RESUME

ANNEXES

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## Remerciements

Au terme de ce travail de recherche, c'est pour moi un agréable devoir d'exprimer mes plus chaleureux remerciements aux nombreuses personnes qui m'ont apporté leur concours et m'ont soutenu dans cette tâche de longue haleine.

Ce travail n'aurait pu voir le jour sans la confiance totale que m'ont accordée le prof Henri Maraite et Dr Bernard Tychon. Qu'ils soient ici remerciés pour le soutien constant et important qu'ils m'ont généreusement donné durant l'ensemble de ce travail et pour leur enthousiasme qui a stimulé ma motivation. J'ai beaucoup apprécié ce « double encadrement », pluridisciplinaire, qui nous a permis, il me semble, d'accéder à des discussions enrichissantes et à des initiatives motivantes. De plus, je ne voudrais passer sous silence leurs qualités humaines, essentielles à mes yeux dans toute relation. Merci beaucoup.

Mes pensées iront ensuite vers le prof Lucien Hoffmann, qui a rendu possible ce travail en y collaborant activement et en mettant à ma disposition les données météorologiques nécessaires aux différentes simulations. Qu'il soit ici remercié pour ses encouragements et ses conseils tout au long de ce travail mais aussi dans le cadre du projet Sintama dont il assure la coordination.

Je tiens à remercier le Dr Jean Marc Moreau d'avoir accepté d'être dans mon comité de thèse, pour m'avoir transmis sa passion pour la modélisation en épidémiologie végétale, et surtout n'avoir jamais cessé de m'encourager et m'appuyer tout au long de cette recherche.

J'exprime toute ma gratitude envers le prof Steven Porter pour avoir accepté de participer à la commission d'examen de cette thèse mais aussi pour sa collaboration très efficace dans l'analyse conceptuelle des paramètres microclimatiques.

Un grand merci également au prof Jacques Nicolas d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail et pour les nombreuses discussions constructives que j'ai eu avec lui sur la modélisation et sa précieuse aide en statistiques.

Je tiens aussi à remercier l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture particulièrement monsieur Antoine Aschman, pour son aide matérielle, et surtout pour ses encouragements tout au long de ce travail.

Je suis également très reconnaissant au Ministère de la Culture, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche du Grand-Duché de Luxembourg pour les moyens qu'ils ont mis à ma disposition pour que ce travail se réalise dans les meilleures conditions.

Je remercie chaleureusement la direction et le personnel du Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück pour leur support technique et matériels qu'ils ont mis à ma disposition pour la réalisation des essais. A monsieur Feltgen pour la mise à la disposition du site Everlange. Je remercie très fortement monsieur Guy Reiland, pour son amitié avant tout, à qui revient la gestion des essais du blé d'hiver à Everlange et qui m'a apporté de nombreux conseils et encouragements ainsi que la diffusion des résultats de cette recherche dans le cadre de la visite annuelle du site d'Everlange. Je remercie également messieurs Mirgain et Feipel pour leur participation technique à la réalisation de ce travail. Mes remerciements s'adressent aussi aux personnels du Lycée Technique Agricole particulièrement Marc pour les équipements parfois lourds des expérimentations aux champs et à Albert pour la moissonneuse.

Mes remerciements débordent du cadre académique et s'adressent également à tout le personnel de la Chambre d'Agriculture luxembourgeoise particulièrement Simone Marx pour ses encouragements et pour sa participation à la valorisation des résultats de cette recherche ainsi que la traduction en allemand des bulletins d'avertissements hebdomadaires réalisés dans le cadre du projet Sintama.

Je souhaite aussi remercier l'Unité de Phytopathologie de l'UCL à Louvain-la-Neuve pour le soutien que j'y ai reçu. Je remercie tout particulièrement Dimitri Lemaire, Frédéric Calay et Olivier Amand qui m'ont apporté de nombreux conseils lors de la réalisation des simulations sur Proculture. Mes remerciements vont aussi à Mercado Vergnes pour son aide précieuse à l'identification des souches de l'helminthosporiose et à Christine Bousmane pour ses encouragements.

J'exprime ma sincère reconnaissance à l'équipe du Dr Bernard Tychon qui m'a permis d'accomplir ce travail dans des conditions amicales et enrichissantes, Abdeslam, Alex, Bertrand, Djaby, Emmanuelle, Etienne, Florence, Yvon, Quentin, Patrice, Pierre, Marie, Virginie, Touré, Stéphanie, et tous les autres qui se reconnaîtront.

Je n'oublie pas l'équipe de la Cellule CREBS du Centre de Recherches Publiques Gabriel Lippmann pour leur collaboration et leurs encouragements. Je tiens à remercier particulièrement Fabienne Crumière, Gilles Drogue et Laurent Pfister pour leurs précieux conseils et pour la mise à disposition des données météorologiques.

Je tiens aussi à remercier Didier Dehem et Laurent Delobe de l'IRM et Lionel Delvaux du Ministère de l'Agriculture de la Région Wallonne pour leur contribution tout au long de ce travail.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble du personnel du Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège pour sa disponibilité. Un grand merci à Michel Gofflot, Catherine Heyman et Anne-Sylvie Lahure pour leur soutien.

Forte dédicace aussi à mes chers amis pour tout ce bon temps passé ensemble : Bruno, Fine, Mafe, Carole, Abderrahim, Abdelmonaim, Abdeslam, Bouafa, Emmanuelle, Florence, Manu, Marie, Mohamed, Hossein, Quentin, Danny, Touré, Djaby, Yvon, Ismail....

Finalement je remercie tendrement ma famille, tout particulièrement mes parents pour leur indéfinissable soutien. Un grand merci à mes frères, mes sœurs, mes nièces, mes neveux ainsi qu'à mes beaux frères et sœurs pour leurs encouragements.

## RESUME

---

EL JARROUDI M.

### Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision

---

Le développement de la lutte raisonnée repose sur une meilleure compréhension des relations entre les plantes hôtes et les agents pathogènes pour positionner un traitement fongicide. L'objectif de ce travail est de proposer un modèle d'avertissement pour les principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg. Afin de se rapprocher de la réalité au champ, nous avons réalisé des essais avec des mélanges de variétés sur des sites avec des caractéristiques climatiques et pédologiques différentes. Notre démarche a consisté tout d'abord à proposer un cadre de modélisation du système « blé-parasite-climat » qui a orienté les expérimentations réalisées.

La variété constitue un élément clé dans la conception d'un système intégré. La valeur du phyllotherme varie entre une variété hâtive et une variété tardive. Pour cette dernière, la valeur du phyllotherme varie aussi entre les feuilles situées à la base et celles situées au sommet de la tige.

Le degré de sévérité de la maladie varie aussi selon la variété (résistante ou sensible). Ce travail propose une étude de simulation entre 2000 et 2002 de la forme anamorphe de *Mycosphaerella graminicola* très connue sous le nom de *Septoria tritici*. Cette simulation se base sur le système Proculture développé par l'Unité de Phytopathologie de l'UCL. Ce système se démarque des 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. Ce système simule correctement la croissance des cinq dernières feuilles. Deux types de validations (quantitative et qualitative) ont été réalisés via ce système en fonction d'une variété susceptible (Bussard) et une variété résistante (Dream). Le succès de la validation qualitative dépasse 90 % à Everlange et atteint 96 à 98 % à Reuland pour les variétés sensibles et les variétés résistantes. Concernant la validation quantitative, les tests statistiques révèlent un grand succès de Proculture pour les

variétés sensibles pendant toutes les années de validation. Cependant, une sous-estimation a été observée pour les variétés résistantes.

Parallèlement à cette étude sur la septoriose, une étude a été développée sur les deux rouilles du blé d'hiver : a) la rouille jaune qui a connu un développement spectaculaire sur les variétés susceptibles (Flair). Cette maladie a eu un développement très précoce en 2000 (stade gonflement). Les premiers foyers ont été observés dès la floraison. Un modèle de simulation de cette maladie a été proposé dans cette étude ; b) la rouille brune, qui a une évolution très importante entre 1999 et 2000 à Everlange et qui constitue la principale maladie de la Moselle luxembourgeois. Elle se répète au fil des années et à des moments cruciaux de la croissance du blé d'hiver. Dans cette étude, nous analysons les paramètres météorologiques nocturnes qui favorisent cette maladie.

En plus des deux rouilles, l'helminthosporiose a connu une évolution remarquable dans les variétés susceptibles entre 1999 et 2000 à Everlange. L'interaction de ces variétés avec un semis sans labour et des conditions météorologiques favorables a été à l'origine de l'expansion très précoce de la maladie en 2000. Cette interaction entre les variétés susceptibles, le microclimat au sein du couvert et certaines pratiques agricoles (la fumure azotée, ...) a été à l'origine de la propagation de l'oïdium en 2000 en Moselle et en 2003 à Reuler.

Enfin, cette étude présente aussi une méthode d'analyse conceptuelle des paramètres météorologiques basée sur la transformation de Fourier. Cette analyse permet de visualiser les différentes fluctuations intra-journalières qui existent entre les sites d'essai. A long terme, il sera possible, avec cette méthode d'automatiser des cartes de risque d'infection des parasites cryptogamiques du blé d'hiver.

---

**Mots-clés :** essai, paramètres météorologiques, variété, blé d'hiver, plante, feuille, système, simulation, *Septoria tritici*, rouille jaune, rouille brune, helminthosporiose, oïdium, analyse, validation, conception, phyllotherme.

---

# **PARTIE I**

- CHAPITRE I : Méthodologie de choix des sites d'essai.
- CHAPITRE II : Méthodologie de mesure.
- CHAPITRE III : Epidémiologie de la septoriose des feuilles du blé au Grand-Duché de Luxembourg entre 1999 à 2003.
- CHAPITRE IV : Epidémiologie de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg.
- CHAPITRE V : Epidémiologie de la rouille jaune au Grand-Duché de Luxembourg.
- CHAPITRE VI : Epidémiologie de l'helminthosporiose au Grand-Duché de Luxembourg.
- CHAPITRE VII : Epidémiologie de l'oïdium au Grand-Duché de Luxembourg.
- CHAPITRE VIII : Etude de l'effet de la fumure azotée sur certaines maladies cryptogamiques foliaires et sur le rendement.

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

### Contexte général

Cette thèse intitulée : « Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision » a suscité un ensemble de réflexions lors de son initiation qui se résume comme suit :

- Pourquoi la culture du blé d'hiver et non pas une autre culture ?

La culture du blé d'hiver constitue la principale occupation des parcelles au Grand-Duché de Luxembourg (10 375 ha au 15 mai 2000) après la prairie qui représente 20 870 ha (STATEC, 2001).

- Quelles sont les principales maladies cryptogamiques du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg pour lesquelles la conception d'un système d'avertissement phytopathologique est une nécessité ?

Cette culture 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, nous citons :

#### Au niveau de la base des tiges :

- a) Les **piétins-verse**, provoqués par *Tapesia yallundae* WALLWORK & SPOONER (1988) : téléomorphe de *Pseudocercospora herpotrichoides* (FRON) DEIGHTON et *Tapesia acufiformis* (BOEREMA, PIETERS & HAMERS) CROUS; anamorphe *P. acufiformis* NIRENBERG (1981).
- b) Les **fusarioses** : altérations du type piétin, provoquées par :
  - *Microdochium nivale* (Fr.) SAMUELS & HALLETT (1983) : téléomorphe, *Micronectriella nivalis*, plus connue sous l'appellation de *Fusarium nivale*;
  - ***Fusarium graminearum*** SCHWABE (1838) : téléomorphe, ***Gibberella zeae*** (SCHWEINITZ) PETCH (1936) ; *F. culmonum*, *F. avenaceum*;
- c) Le piétin échaudage provoqué par *Gaeumannomyces graminis*.

#### Au niveau des feuilles :

- a) La **rouille** jaune provoquée *Puccinia striiformis* WESTENDORP et la rouille brune provoquée par *Puccinia recondita* ROBBINS & DESMAZIERES;
- b) Les **septorioses** des feuilles causées par *Mycosphaerella graminicola* (FUCKEL) SCHROETER; anamorphe : *Septoria tritici* ROBBINS & DESMAZIERES; et par *Leptosphaeria nodorum* MULLER; anamorphe : *Septoria nodorum* BERKELEY;
- c) L'**helminthosporiose** : *Pyrenophora tritici-repentis* (téléomorphe de l'helminthosporiose, tache helminthosporienne), synonyme : *Drechslera tritici-repentis*, *Helminthosporium gigantum* (tache zonée);
- d) L'**oidium**, provoqué par *Blumeria graminis* e.o. SPEER anamorphe, *Oidium monilioides*.

---

Au niveau des épis :

- a) L'oidium sur épi;
  - b) Les fusarioses sur épi;
  - c) La septoriose à *Leptosphaeria nodorum* MULLER; anamorphe : *Septoria nodorum* BERKELEY;
  - d) La rouille jaune provoquée par *Puccinia striiformis* WESTENDORP.
- Quelles sont les relations entre : date de semis – stade phénologique – numéro de la feuille émergée – moment et degré d'infection de cette feuille en fonction des facteurs intraparcellaires (densité de semis, matière organique) ? et facteurs micro-météorologiques ainsi que du comportement variétal ?

"Entre les parcelles d'une même exploitation, beaucoup de facteurs culturaux peuvent différer : variété (hâtive, tardive, résistance, sensibilité), date de semis, précédent cultural, densité de semis, apport en azote ; chacun d'entre eux a une influence sur les développements des maladies. Il est dès lors rare que l'ensemble des parcelles présente le même état sanitaire ou les mêmes risques d'attaques fongique et il faut donc raisonner les traitements fongicides parcelle par parcelle (RAPILLY, 1991)".

Les relations entre le développement d'un agent pathogène et les dommages qu'ils engendrent ne sont pas directes (LE MAY, 2002). La structure du couvert joue un rôle prépondérant dans la sensibilité variétale (LE MAY, 2002). Comme celle-ci n'est pas stable d'une année à l'autre, la sensibilité des variétés face à la maladie peut même s'inverser selon les années. Les positions spatiales respectives des deux organismes jouent un rôle crucial dans l'expression de la nuisibilité (ROBERT, 2003). Le choix variétal en est un exemple trivial, mais les interactions avec la fertilisation azotée par exemple et les facteurs météorologiques en général restent peu claires.

Le problème posé aux acteurs de la production végétale (agriculteurs, agents de développement, chercheurs et responsables politiques) est donc particulièrement complexe.

Il est clair que le développement de la lutte raisonnée repose en partie sur la compréhension et la quantification des différents mécanismes affectés par les agents pathogènes afin d'évaluer la nuisibilité des pathosystèmes impliqués, c'est-à-dire d'estimer l'impact réel des maladies sur le peuplement végétal, quel que soit le scénario épidémique. Cependant, à l'heure actuelle, le Grand-Duché de Luxembourg ne dispose pas de moyens de contrôle performants et rapides permettant d'évaluer l'ampleur des dégâts causés par les maladies cryptogamiques du blé d'hiver.

La chute récente du prix du grain a encore réduit la marge de manœuvre de l'agriculteur. Ce dernier est obligé d'abaisser les coûts d'intrants de fongicides en même temps qu'il doit réduire au minimum le risque de dégâts par suite aux attaques des maladies cryptogamiques du blé d'hiver. D'autre part, la céréaliculture luxembourgeoise recherche en premier lieu une production de qualité avec un minimum d'intrants chimiques. La grande irrégularité du développement des maladies rend néanmoins difficile l'appréciation du risque de dégâts par l'agriculteur. Ceci l'incite à des traitements d'assurance souvent inutiles voire à impact nuisible sur l'environnement. Par ailleurs, plusieurs organisations nationales et internationales, dont les communautés européennes, préconisent une diminution des quantités utilisées de

produits phytopharmaceutiques (Directive (CEE) n° 2078/92<sup>1</sup>). L'objectif escompté par la diminution des quantités de ses produits chimiques est de réduire les risques éventuels d'effets nocifs ou secondaires sur l'environnement, qui peuvent être liés à leur usage inconsidéré. Le Grand-Duché de Luxembourg recommande dans le même sens la méthode de production intégrée du blé d'hiver qui préconise : a) des diminutions des quantités de matières actives à l'hectare ; b) des pulvérisations avec des produits phytopharmaceutiques qui présentent moins de risques pour l'environnement. Désormais, les objectifs passent de « produire plus » à « produire plus propre » (DELOS *et al.*, 2002) afin de promouvoir une agriculture durable. Un des enjeux majeurs actuels de l'agriculture est ainsi de concilier rentabilité, les produits de traitement du blé représentent à l'heure actuelle le poste le plus important des charges opérationnelles, avec qualité des produits et préservation de l'environnement. Les dommages ne sont plus évalués seulement en terme de pertes de rendement mais aussi en terme de diminution de la qualité des produits (changement de composition des produits, résidus de produits phytosanitaires, mycotoxines, ...) et de détérioration environnementale. Il devient donc indispensable de raisonner la lutte chimique en diminuant quantitativement les apports et en choisissant des dates pertinentes de traitement. Moduler le nombre d'applications fongicides en fonction de la pression parasitaire est donc une stratégie qui peut s'avérer à la fois économiquement intéressante et plus respectueuse de l'environnement. Cependant, le Grand-Duché de Luxembourg ne dispose pas de système d'avertissement pour évaluer l'opportunité d'investir dans la protection fongicide.

Ainsi, la première motivation du choix de ce sujet est surtout la recherche d'un optimum économique dans le contrôle de la liaison sévérité de maladie-efficacité de traitement-gain de rendement.

Dans la pratique commune, les stratégies de protection de la culture de blé d'hiver comptent sur deux à trois applications de fongicides pour lesquelles le choix des moments est guidé par le stade phénologique plutôt que par l'évolution de la maladie et les pertes de rendement (LOVELL *et al.*, 1997).

Dans l'optique de contribuer à l'amélioration de cette situation, une collaboration informelle a été établie depuis 1999 entre le Département en Sciences et Gestion de l'Environnement de l'université de Liège (ex FUL), l'Unité de Phytopathologie de l'Université catholique de Louvain à Louvain-la-Neuve (UCL) et la Cellule de Recherches en Environnement et Biotechnologies du Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann (CREBS) autour de cette recherche doctorale. Celle-ci a été réalisée en étroite collaboration avec l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA), Service de la Protection des Végétaux qui a proposé cette recherche et avec le Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück pour l'installation des sites d'essais.

Les objectifs de cette thèse, qui répondent aux souhaits de l'ASTA, sont :

- Déterminer les principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché du Luxembourg. Aucune quantification de maladie n'a été établie avant cette thèse ;

---

<sup>1</sup> Règlement (CEE) n° 2078/92 du conseil du 30 juin 1992 concernant les modes de production agricole compatibles avec les exigences de la protection de l'environnement ainsi que l'entretien de l'espace rural (journal officiel des communautés Européennes n°215 du 30 juillet 1992).

- Concevoir et élaborer un système d'avertissement pour les principales maladies du blé d'hiver. Cet avertissement vise à rationaliser les décisions de traitements phytosanitaires afin de réduire la charge de pesticides appliqués sur la culture, d'augmenter l'efficacité des traitements et de diminuer ainsi le coût global de la lutte chimique.

### **Vue d'ensemble de la culture du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg**

Les producteurs luxembourgeois de semences (Luxemburger Saatbau-Genossenschaft) est une coopérative qui s'occupe des essais et de la commercialisation des semences du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg. L'organisme de Contrôle et la Centrale Paysanne Services s.a.r.l., agissant sous le contrôle de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (Article 4, Réglementation grand-ducale). Les semences de céréales provenant directement de semences de base ou de semences certifiées de la première reproduction, officiellement certifiées soit dans un ou plusieurs Etats Membres de la Communauté Européenne, soit dans un pays-tiers auquel l'équivalence a été accordée conformément aux prescriptions communautaires (Article 15, Réglementation grand-ducale). Les variétés du blé semées au Grand-Duché du Luxembourg sont majoritairement importées de l'Allemagne. Les conseils aux agriculteurs sur le choix variétal sont formulés par la Chambre d'Agriculture.

Le blé d'hiver est semé au Grand-Duché de Luxembourg entre fin septembre et le 20 octobre pour la plupart des agriculteurs. Le travail du sol dépend des agriculteurs. Dans la Moselle, généralement, le travail du sol est effectué par deux passages avec cover crop (Grubber), un passage avec herse rotative ; travail du sol est réduit lorsque le précédent cultural est colza et aussi pour éviter le risque de glaçage. Les semis sans labour sont pratiqués de plus en plus au Grand-Duché de Luxembourg.

Les essais de la fumure azotée sont réalisés par le Lycée Technique Agricole qui se base sur le logiciel Azote développé par le Professeur Falisse de Gembloux. Des conseils de fumure azotée en grandes cultures et cultures fourragères sont formulés par la Chambre d'Agriculture dans le but de prévenir la surfertilisation et d'optimiser la fumure. Les conseils sont justifiés par un ensemble d'outils d'analyse pratiquée par la Chambre d'Agriculture (analyses de sol, de lisier d'ensilage, plans de fumure, visites du champ). La fumure azotée est appliquée pendant trois phases du blé d'hiver : a) la première application se fait à la sortie de l'hiver (généralement entre fin février et début mars) avec une dose variable selon le type de sol ; b) La deuxième dose est appliquée pendant les deux premières semaines d'avril généralement au stade premier nœud avec une dose variable ; c) La troisième dose est appliquée généralement pendant la deuxième décennie de mai (généralement pendant la sortie de la dernière feuille).

L'application des herbicides se fait généralement entre fin mars et fin avril avec différents produits (Topik, Javelin, DPP, Cameo, ...).

Les agriculteurs luxembourgeois pratiquent souvent au moins 2 traitements de fongicides pendant la saison culturale. Les conseils de gestion aux traitements sont donnés officiellement par la Chambre d'Agriculture. Le régulateur de croissance (Cycocel, Terpal et Moddus) est appliqué souvent avec un herbicide ou un fongicide entre fin avril et début mai. Un mélange de produits fongicide est appliqué à chaque passage. Le premier traitement est appliqué généralement au stade premier nœud par un

mélange de Stéréo (1.3 l/ha) et Alto (0.3 l/ha) associé à un régulateur de croissance. Les mélanges de produits varient selon les agriculteurs. Le deuxième traitement se fait au stade épiaison avec un mélange des produits. Les produits les plus utilisés sont : Sphère (1 l/ha), Opus team (1.5 l/ha), Stéréo (1 l/ha), Allegro (1 l/ha), Opéra (1.5 l/ha), Amistar (1 l/ha), Bravo (2 à 2.5 l/ha), Alto (0.5 l/ha).

## **Problématique générale et étude des différents impacts**

### **Impact de l'utilisation de fongicides**

La question des fongicides et de leur application est très complexe. Le coût d'un traitement avec des produits modernes est évalué à 67 EUR/ha et exige un gain de production de l'ordre de 650 kg/ha (prix du blé : 0.1 EUR/kg) pour être rentable (MEEUS *et al.*, 2000). Il est clair que les agriculteurs sont confrontés à une double contrainte :

- Nécessité de diminuer le coût des intrants tout en assurant une rentabilité financière de la culture;
- Préservation de l'environnement en limitant les charges inutiles qui peuvent notamment stimuler le phénomène de résistance de souches aux pesticides.

L'investissement fongicide est en effet le poste de charges opérationnelles le plus important. Il est donc légitime que les agriculteurs soient en perpétuelle recherche d'un optimum économique. Recherche rendue encore plus nécessaire par la forte érosion du prix du blé qui oblige à trouver de nouveaux équilibres.

Les fongicides les plus utilisés sur les céréales sont les strobilurines depuis 1997 et les inhibiteurs de la biosynthèse des stérols ou IBS. Ces molécules (IBS) représentent la catégorie la plus efficace des fongicides disponibles pour lutter contre de nombreux pathogènes. Il existe deux groupes principaux de fongicides IBS. Les inhibiteurs de déméthylation (les DMI triazoles, imidazoles, pyrimidines, etc.) qui possèdent un large spectre d'activité vis-à-vis d'un ensemble de pathogènes économiquement important (SKIDMORE, 1993 ; STEVA, 1993 ; LEROUX *et al.*, 2002) et les « morpholines » (morpholines, pipéridines) qui ont un spectre d'activité plus étroit et sont principalement utilisées soit seules soit mélangées avec des DMI pour lutter contre les pathogènes des céréales surtout l'oïdium et les rouilles.

Cependant, une résistance croisée (la résistance est croisée entre deux groupes de fongicides lorsqu'une souche de champignon résistante à l'un de ces fongicides est également résistante à l'autre fongicide) entre les fongicides appartenant au groupe des DMI a été mise en évidence pour des doses réduites multiples (METCALFE & SHAW, 1998; METCALFE *et al.*, 2000).

### **Impacts des agents pathogènes au niveau de la plante**

Les modes d'actions des agents pathogènes sur le fonctionnement des populations cultivées sont complexes et varient au fil du temps en fonction des conditions météorologiques. Ces derniers sont le leitmotiv du passage de la maladie d'une seule plante à une épidémie qui englobe une grande partie de la population hôte (figure 1-1).

Les agents pathogènes perturbent une ou plusieurs fonctions de la plante ou de ses organes, modifient souvent la photosynthèse des feuilles mais peuvent également obstruer les vaisseaux de ces mêmes feuilles (figure 1-2).

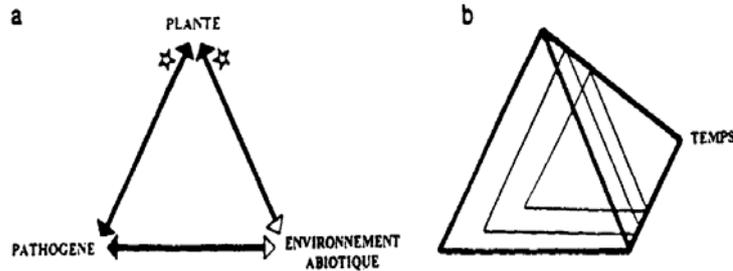


Figure 1-1 : Le triangle a représente les interactions entre la plante, l'agent pathogène et l'environnement (météo). La pyramide b montre que ces interactions évoluent avec le temps. (AYRES, 1991 ; RAPILLY, 1991)

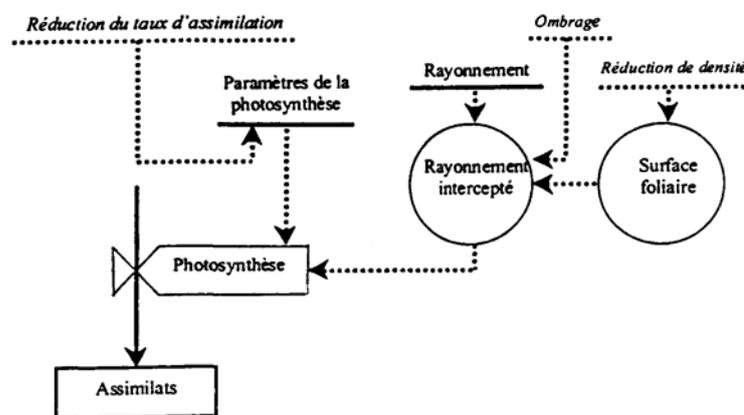


Figure 1-2 : Diagramme décrivant les fonctions pouvant être affectées par un parasite cryptogamique de feuille. (NEY *et al.*, 1998)

BOOTE *et al.* (1983) établissent un classement des parasites selon les processus affectés chez l'hôte. Sept classes sont définies selon les perturbations provoquées : réduction de biomasse, réduction de photosynthèse, accélération de la sénescence foliaire, réduction de l'absorption lumineuse, détournement des assimilats, consommation des tissus et perturbation de l'absorption d'eau (WAGGONER & BERGER, 1987 ; BRYSON *et al.*, 1997). Les auteurs insistent sur le fait que certains agents pathogènes affectent plusieurs processus qui peuvent être eux-mêmes en interaction. Pour les maladies foliaires, la proportion de tissus sains ou fonctionnels par rapport aux tissus malades est largement utilisée pour estimer les pertes de rendement.

BASTIAANS (1991) *in* ROBERT (2003) propose un modèle simple pour estimer les perturbations de la photosynthèse de la feuille malade. Ce modèle permet de classer les effets des maladies foliaires sur la photosynthèse des feuilles en trois catégories selon que la diminution est égale, supérieure ou inférieure à la proportion de surface présentant des symptômes. Une perturbation égale à la proportion de surface malade suggère que la surface verte ait un fonctionnement normal alors que la surface malade ne photosynthétise plus. Une perturbation supérieure à la proportion de surface visiblement atteinte signifie que le parasite diminue la photosynthèse de la surface verte qui ne présente pas de symptômes apparents.

L'explication de ce phénomène donne lieu à plusieurs hypothèses. Le pathogène peut sécréter des enzymes ou des composés phytotoxiques qui diffusent ou sont emportés par le flux transpiratoire dans les parties non colonisées de la feuille. La croissance du mycélium à l'intérieur des feuilles peut entraîner des perturbations dans les flux d'eau et

la destruction des chloroplastes. Enfin, une perturbation inférieure à la proportion de surface visiblement atteinte signifie soit que le parasite ne perturbe pas complètement le fonctionnement photosynthétique de la surface malade, soit qu'il entraîne une surcapacité ou compensation photosynthétique des parties vertes autour des lésions. Certaines études (WAGGONER & BERGER, 1987 ; FILHO *et al.*, 1997 ; BASSANEZI *et al.*, 2001 ; DE JESUS JUNIOR *et al.*, 2001) calculent le GLAI (Green Leaf Area Index) ou le HAD (Healthy leaf Area Duration) ou encore le HAA (Healthy Leaf Area Absorption).

Cependant, bien que ces relations prennent en compte l'effet des maladies sur le couvert, elles présentent un certain nombre de limites car elles sont notamment statiques. Elles ne tiennent pas compte des compensations possibles de la plante malade au cours du déroulement des épidémies. De plus, deux épidémies différentes peuvent induire un même GLAI ou HAD et pourtant entraîner une nuisibilité différente. JOHNSON (1987) précise ainsi qu'il est nécessaire, dans certains cas, de tenir compte de la localisation de la maladie dans le couvert. Par exemple, la perte des feuilles âgées du bas du couvert n'a pas les mêmes conséquences que celles des feuilles plus jeunes du haut du couvert. La diminution de photosynthèse des feuilles malades situées à la base peut être compensée soit par une augmentation de photosynthèse de feuilles supérieures saines, soit par une augmentation de surface foliaire. La quantification du niveau et du seuil maximal de compensation n'est pas aisée (NEY *et al.*, 1998). C'est pourquoi de nombreux auteurs ont adopté une autre démarche qui consiste à intégrer les perturbations identifiées sur la plante malade dans un modèle d'élaboration du rendement. Cette fois, la démarche est dynamique et permet de prendre en considération les compensations au sein de la plante malade à travers les interactions entre les processus d'un modèle plante ainsi que la localisation des symptômes dans le couvert. Dans leurs travaux, (GOODING *et al.*, 2000 ; GOODING *et al.*, 2002) ont montré que le rendement du blé est particulièrement corrélé à la durée de maintien de la surface verte des trois feuilles supérieures après leur émergence. Les maladies cryptogamiques peuvent causer des dommages considérables si les trois feuilles supérieures du blé ont été attaquées (KING *et al.*, 1983 ; SHAW & ROYLE, 1989a). La chute du rendement peut être très importante si la dernière feuille est attaquée (SHAW & ROYLE, 1989b ; THOMAS *et al.*, 1989 ; SHAW & ROYLE, 1993).

Les trois dernières feuilles constituent les facteurs déterminants pour le rendement (MOREAU & MARAITE, 1999 ; MOREAU & MARAITE, 2000). Selon GOODING *et al.* (2000) la dernière feuille a probablement une importance particulière parce que :

- C'est la dernière feuille à être formée. Donc, si les autres feuilles sont atteintes, toute la compensation sera basée sur cette feuille ;
- Elle est au sommet du feuillage de la culture et intercepte donc plus de lumière que les feuilles inférieures ;
- Elle est dans la proximité vasculaire directe de l'épi, au contraire des autres feuilles.

Les approches par modélisation estiment qu'au moins 45 % de l'hydrate de carbone de grain sont dérivés de la dernière feuille (F1) (LUPTON, 1972). Il est donc nécessaire de connaître le lien entre la croissance des peuplements malades (biomasse aérienne / m<sup>2</sup>) et leur rendement (biomasse des grains / m<sup>2</sup>). Dans les couverts sains, on estime qu'il y a une relation linéaire entre le rendement et la biomasse : le rendement est le produit de la biomasse et de l'*Harvest Index (HI)*. Dans les couverts malades, en revanche, le transfert des assimilats par les parasites peut être perturbé au niveau des feuilles

---

malades et de la plante entière (GAUNT, 1995). Par conséquent, le HI peut être modifié (BASTIAANS, 1993 *in* ROBERT, 2003).

Dans la feuille infectée, le champignon constitue un nouveau puits qui perturbe les translocations à courte distance au sein de la feuille. En prélevant les assimilats de la feuille pour son propre métabolisme et pour la production des spores, le parasite entre en compétition avec la plante (GARRY, 1996). De plus, des feuilles fortement infectées peuvent devenir des puits à l'échelle de la plante et bénéficier d'un apport de saccharose important (SCHOLES *et al.*, 1994). Dans ce cas, le pathogène utilise non seulement les assimilats de la feuille contaminée, mais peut aussi profiter des assimilats d'autres organes dirigés vers la feuille infectée. Ainsi, les flux de carbone entre les organes peuvent être perturbés. La concurrence avec les organes en croissance affecte d'autant plus la plante que la période d'attaque du parasite est précoce (BASTIAANS, 1993 *in* ROBERT, 2003). Dans ce cas, estimer la perte de rendement des couverts malades nécessite de comprendre la perturbation dans la répartition des assimilats des plantes malades.

MADDEN & NUTTER (1995) ont proposé une synthèse des paramètres importants à prendre en considération pour la prédiction des pertes de rendement : ce sont le positionnement relatif des épidémies et du cycle de culture, la localisation des maladies dans le couvert, les effets physiologiques perturbés et leur quantification et enfin, les compensations possibles.

### **Impact de la mise en place d'un système d'avertissement**

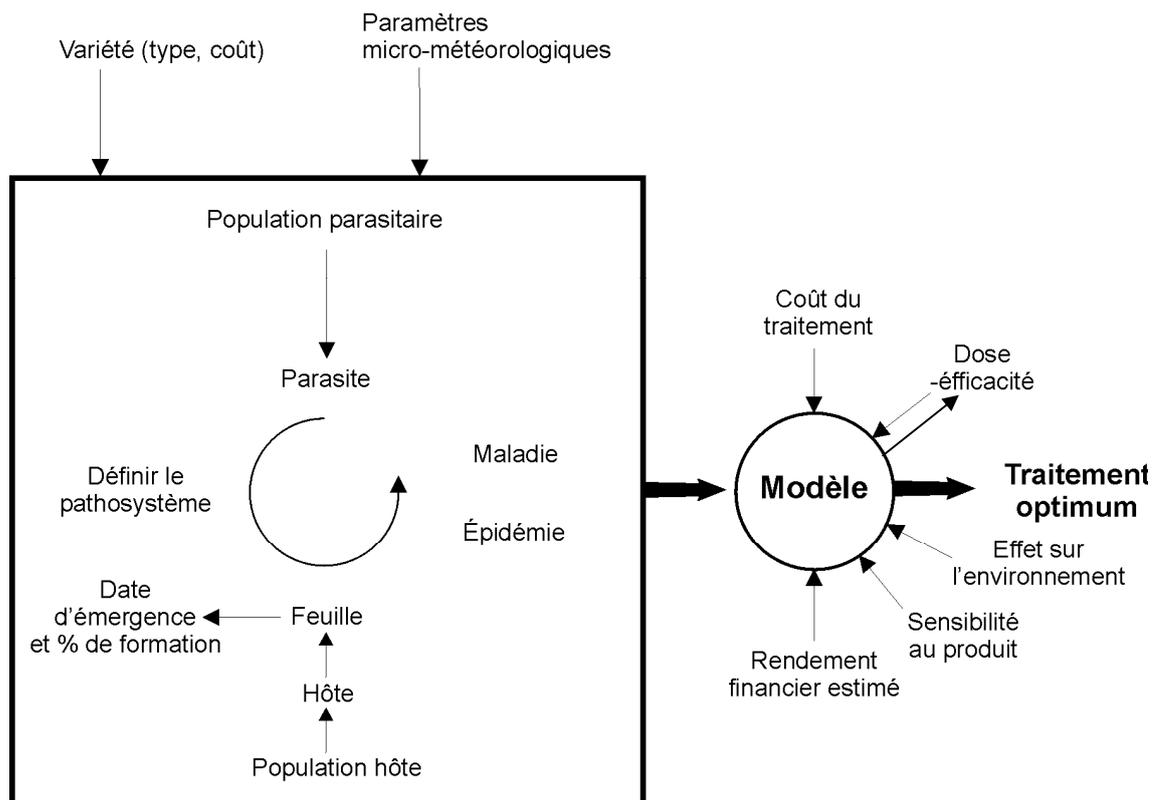
Les modèles couplés « plante-parasite » sont capables de simuler les dommages à partir de notes épidémiques initiales et permettent ainsi de déterminer les traitements nécessaires et leurs dates en cours de campagne. Ce type de modèle permet de simuler le développement des maladies dans le cadre de nouveaux itinéraires techniques ou pour de nouvelles variétés.

Le couplage entre la formation des feuilles et le développement de la maladie devrait se faire en parallèle avec l'évolution des paramètres épidémiologiques (efficacité d'infection, période de latence, taux de sporulation) et les facteurs micrométéorologiques qui stimulent l'épidémie. Ceci est nécessaire pour comprendre et prévoir les épidémies des parasites cryptogamiques du blé d'hiver (DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 2000). Cependant, pour que la prédiction de ces systèmes d'avertissement soit utile aux agriculteurs, ils devraient contribuer à la définition du moment optimum de traitement fongicide. Ceci n'est possible que par la définition d'un seuil de nuisibilité des parasites cryptogamiques du blé d'hiver. Il s'agit de définir le seuil de maladie à prendre en considération parmi les cinq dernières feuilles (F5 à F1) pour préconiser un traitement fongicide. La définition de ce seuil est établie par la relation qui existe entre le gain de rendement et le niveau de maladie enregistré sur les cinq dernières feuilles entre les stades GS31 et GS59 en fonction du comportement variétal (ZADOKS *et al.*, 1974). Pour connaître le moment où ce seuil de nuisibilité est atteint, les systèmes d'avertissements devraient être équipés d'un module qui permet de simuler les futures latences et de prévoir les niveaux de maladie quantifiés pour les cinq dernières feuilles. Cette prévision des niveaux de maladie n'est possible que par la détermination d'une fonction mathématique qui explique l'évolution de la maladie en fonction de la croissance de la plante (JOWETT *et al.*, 1974). La description mathématique de cette fonction diffère selon le type de champignon en question et la situation du système

hôte/parasite tout en décrivant les variations quantitatives et qualitatives que subissent les populations d'hôtes en fonction de l'évolution des populations des parasites.

Enfin, notre conception finale de la lutte intégrée consiste à bien comprendre les interactions qui existent dans un système phytosanitaire en relation avec les paramètres environnementaux en général et micrométéorologiques en particulier.

Il s'agit de développer un modèle qui permet de définir la relation existant entre le parasite et la plante hôte. Ce modèle doit permettre de protéger les trois dernières feuilles du blé et de cibler d'une manière significative le traitement optimum (figure 1-3) entre les stades phénologiques GS31 et GS69 (ZADOKS *et al.*, 1974).



**Figure 1-3 : Schéma montrant l'objectif principal du modèle d'avertissement à concevoir au Grand-Duché de Luxembourg.**

En parallèle, à cette analyse du pathosystème, une autre analyse pourrait être consacrée au couple dose-efficacité et à une estimation même grossière du rendement financier pour les différents scénarios de traitement.

### **Les systèmes d'avertissement utilisés dans les pays limitrophes du Grand-Duché du Luxembourg**

#### **Description des principaux modèles concernant *S. tritici***

De nombreux modèles reliant principalement climat et développement de la maladie ont été élaborés dans les pays limitrophes du Grand-Duché du Luxembourg depuis les années 1960. Epipre (synonyme de Epidemiology and prediction and prevention),

---

développé aux Pays-Bas, est, à l'échelle mondiale, l'un des premiers modèles de la gestion des maladies du blé d'hiver (IVES *et al.*, 1984).

Le but qui était escompté par la conception de ce système opérationnel informatisé était de permettre aux agriculteurs de suivre l'état sanitaire de leurs cultures et de leur proposer des recommandations sur les modalités de traitements chimiques de leurs champs ainsi que les retombées économiques de telles décisions (RABBINGE & RIJSDIJK, 1984 ; ZADOKS & RIJSDIJK, 1984). En effet, dès les années 60, ZADOKS s'intéresse à la dynamique des épidémies. En 1971, il propose un modèle de développement de la population de parasites en intégrant les paramètres climatiques (ZADOKS, 1971). Il met en évidence les deux paramètres majeurs du développement des épidémies : la durée de la période de latence et le taux de multiplication du parasite. Epipre utilise, pour son fonctionnement, des données météorologiques journalières pour une période précise. Il ne donne aucune indication sur la période hivernale du fait que les données météorologiques antérieures à la période printanière ne sont pas incluses dans sa base de donnée. Ce système se base sur une fonction d'évaluation stochastique. L'agriculteur observe sa parcelle et à partir de cette seule donnée insérée par celui-ci, le système calcule l'évolution future de la maladie en se basant sur cette fonction stochastique. Ceci rend les prévisions de ce système peu discriminantes parce que les références de base fournies par l'agriculteur sont insuffisantes.

En Allemagne, un système d'avertissement nommé Proplant a été développé pour prévoir un ensemble de maladies cryptogamiques de diverses plantes cultivées (blé d'hiver, betterave, colza, pomme de terre, ...). Ce système donne une indication sur l'état général des maladies présentes au niveau des champs. Cependant, l'absence d'indication sur les feuilles du blé d'hiver (émergence et développement de la maladie) ne permet d'estimer que vaguement l'utilité de procéder à un traitement.

En France, un modèle de précision Presept basée sur les conditions climatiques a été développé dans les années 90 suite aux recherches de RAPILLY & JOLIVET (1976) sur le modèle Episept. Ce modèle se base sur des données météorologiques horaires et utilise des méthodes mathématiques pour l'étude des processus stochastiques de développement des surfaces malades et des surfaces fructifiées. La méthodologie appliquée par le modèle Episept paraît très intéressante pour comprendre l'épidémiologie du parasite en fonction des conditions météorologiques. Cependant, le manque d'informations concernant la relation évolution du parasite - formation des feuilles - stade de la plante, rend les simulations du modèle Episept et, par conséquent, celles du Persept très régionales et très globales.

Dans tous ces modèles, la maladie est une variable d'entrée et l'évolution de l'épidémie n'est pas modélisée en fonction de la formation des feuilles. Ceci affecte la qualité des prévisions. On peut s'interroger sur les modalités de couplage : peut-on combiner deux modèles élaborés indépendamment l'un de l'autre ou est-il nécessaire d'avoir identifié les variables de couplage avant la conception de chacun des modèles ? Il est en effet nécessaire de distinguer clairement l'interfaçage de deux modèles qui permet de les réunir par l'intermédiaire d'un nombre très limité de variables et le couplage qui constitue une véritable question de recherche et de modélisation (ROBERTS, 2003). Dans cette optique, la plate-forme « Proculture » développée par l'Unité de Phytopathologie de l'UCL (MOREAU & MARAITE, 1999 et 2000) constitue une base intéressante pour la gestion de la culture du blé d'hiver au Grand-Duché du Luxembourg. Proculture se base sur les données météorologiques horaires (pluie, température et humidité) des stations

météorologiques les plus proches des champs de blé d'hiver pour identifier les périodes d'infection les plus favorables de *S. tritici*. Ces conditions d'infections sont :

" Pluie  $\geq 0,1$  mm pendant la première heure pour préparer les pycnides et pluie  $\geq 0,5$  mm pendant la deuxième heure pour éclabousser ces pycnides ; HR  $> 60$  % sans interruption pendant 16 heures ; Température  $> 4^{\circ}\text{C}$  sans interruption pendant 24 heures (MOREAU & MARAITE, 1999 ; CALAY *et al.*, 2002)."

Suite à chaque infection, de nouvelles pycnides apparaissent après une période de latence calculée par les équations polynomiales développées par SHAW (1990) et qui dépendent de la température (MOREAU & MARAITE, 1999). 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 (MOREAU & MARAITE, 1999). Ce qui fait la particularité de "Proculture" par rapport aux autres systèmes est surtout le développement d'un algorithme permettant le couplage d'un module de croissance basé sur un phyllochrome principal (130 jours à base  $0^{\circ}\text{C}$ ) et la prise en compte de la période de latence qui permet à la fois de simuler la formation des cinq étages foliaires et l'évolution de la septoriose sur ces étages (MOREAU & MARAITE, 2000). Pour son fonctionnement, le programme Proculture se base sur des données abiotiques (citées ci-dessus) et biotiques. Les données biotiques sont spécifiques à chaque parcelle et correspondent aux données suivantes :

- La date de semis, référence indispensable pour démarrer la somme de degrés - jours ;
- Les stades phénologiques observés et le numéro ainsi que le pourcentage de la feuille formée pour le recalage de la phénologie.

Le système considère que les feuilles F5 et F4 sont toujours assez basses et peuvent être atteintes par l'inoculum des feuilles inférieures alors que F3 peut être infectée seulement : a) si l'infection est exprimée sur les feuilles F4, F5, et que F3 est en émergence, cette dernière peut être atteinte très probablement par F4 et moins par F5 ; b) la F2 est touchée si les infections sont déjà exprimées sur F3 ou F4 et que F2 est en formation, la F1 est infectée si et seulement si les infections sont exprimées sur F2 et F3 (MOREAU & MARAITE, 1999). Cette plate-forme informatique a une page Web facilement accessible (<http://procultureweb.fymy.ucl.ac.be:8080>) où l'utilisateur peut introduire les dernières données récoltées sur le terrain et procéder aux simulations relatives à chaque variété semée (figure 1-4). La capacité de Proculture à s'adapter aux conditions spécifiques des parcelles et à simuler les infections en cours, mais non encore exprimées en fonction de la formation de chacune des cinq dernières feuilles, la démarque des systèmes d'avertissements plus classiques. Proculture est continuellement amélioré grâce aux résultats de chaque saison. Actuellement, il est possible de faire le recalage de la septoriose en introduisant le numéro de la feuille et le pourcentage de la surface foliaire présentant les symptômes ou la fréquence de feuilles avec symptômes de *S. tritici*. Il est possible aussi de prévoir le pourcentage de la surface foliaire présentant des symptômes en se basant sur une fonction mathématique non linéaire ajustée par plusieurs données d'observations.

Dans la prévision future des symptômes, une collaboration avec les services de prévisions météorologiques apportera plus de précision que l'utilisation des données de températures antérieures. La comparaison de Proculture aux autres systèmes d'avertissements situés dans les pays limitrophes du Grand-Duché de Luxembourg

confirme la pertinence et l'importance de ce système pour la gestion du blé d'hiver dans ce pays (Tableau 1-1).

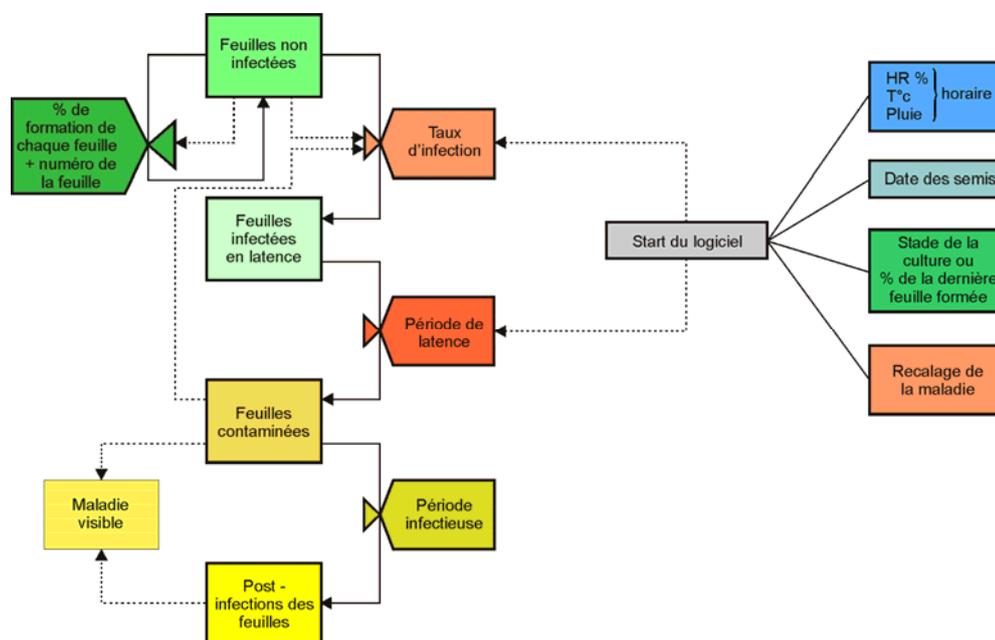


Figure 1-4 : Principales étapes d'ajustement de Proculture via le Web.

Tableau 1-1 : Comparaison entre les différents systèmes d'avertissements situés dans les pays limitrophes du Grand-Duché de Luxembourg.

Paramètres	Epipré	Persept	Proplant	Proculture
Variation Hivernale.	non	non	non	oui
Recalage phénologique.	oui	non	non	oui
Fonction de tendance.	Stochastique	Stochastique	non	mécaniste
Recalage de la fonction de tendance.	Au moins 2 à 3 observations.	non	non	Une seule observation
Echelle de prévision.	Parcelle.	Régional	Régional	Parcelle
Couplage phyllochrome-parasite.	non	non	non	oui
quantification	non	non	non	oui
Recalage de la maladie.	oui	non	non	oui
Approche mécaniste	non	non	non	oui
Indice de rendement et maladie	tendance	non	non	oui

Cependant, ces systèmes d'avertissement, ne prennent pas en considération les interactions entre les agents pathogènes. Ces derniers sont peu étudiés, mais leurs études deviennent de plus en plus fréquentes. Les interactions entre les agents pathogènes

peuvent influencer non seulement le développement des épidémies mais également les fonctions de dommages. WEBER *et al.*, (1994) ont montré que le développement de *Septoria nodorum* et de *Erysiphe graminis* dans un couvert de blé dépend fortement des interactions entre les deux agents pathogènes.

De plus, l'estimation des pertes de rendement causées par un complexe parasitaire par l'intermédiaire de la somme des fonctions de dommage de chacun des parasites peut être fautive lorsque les interactions entre les fonctions de dommage se produisent. L'effet combiné sur le rendement peut être égal, plus important ou moins important que la somme des pertes dues aux agents pathogènes isolés.

Quantifier les interactions entre les agents pathogènes pourrait apporter une grande contribution pour expliquer les épidémies de certaines maladies et l'estimation de rendement.

Dans ce contexte, une meilleure connaissance de la relation entre les formations des feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg et les principaux agents pathogènes qui les affectent sont nécessaires. Ce constat a motivé fortement le choix de ce projet de recherche.

Le haut intérêt scientifique de l'étude du couplage entre la formation des cinq dernières feuilles du blé d'hiver et l'évolution des périodes d'infection a également motivé cette recherche.

La conception d'un système d'avertissement pour les principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg devient une nécessité. La généralisation rapide de la résistance de la septoriose du blé aux strobilurines dans une grande partie de l'Europe (AMAND *et al.*, 2003) impose un changement radical dans la manière d'utiliser les moyens de lutte disponibles à ce jour. Il convient de suivre le développement de l'épidémie de chaque maladie affectant chaque maladie affectant les feuilles du blé d'hiver et essayer de la comprendre. Pour atteindre cet objectif, il est important d'évaluer chaque épidémie en fonction des caractéristiques pédo-climatiques du Grand-Duché de Luxembourg mais aussi des caractéristiques de la plante hôte. Parmi ces caractéristiques la modélisation de la formation des feuilles sur base de phyllotherme (somme de degrés jours nécessaires à la formation d'une feuille) qui est indispensable pour les maladies à gradient de dispersion verticale.

Enfin, sur base des différents arguments développés ci-dessus, sept principales hypothèses ont été formulées pour cette thèse :

1. la septoriose - maladie la plus préoccupante dans les cultures des pays européens (BROWN *et al.*, 2001). Cette maladie est la principale maladie affectant la culture du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg;
2. PERRIER (1979) *in* RAPILLY (1991) distingue au niveau microclimatique, deux groupes de données; les uns dépendent du couvert végétal comme le rayonnement, la vitesse du vent ; les autres comme la température, l'humidité relative, l'eau libre en quantité et durée, dépendent à la fois du couvert végétal et des données mésoclimatiques. Ainsi, notre hypothèse est que le microclimat local favorise l'effet régional de certaines maladies telles que la rouille brune ;
3. La réussite des contaminations et les taux de maladies qu'elles provoquent, dépendent de la concentration en inoculum, des conditions environnementales

---

dont le climat, de la morphologie de l'hôte et du peuplement et de l'évolution au cours du temps de leurs réceptivités (RAPILLY, 1991). Sur cette base, notre hypothèse est que les conditions d'infections sont spécifiques à chaque champignon;

4. le système Proculture se base pour la simulation de l'émergence des feuilles sur une valeur constante du phyllotherme quelque soit la variété (MOREAU & MARAITE, 1999). Notre hypothèse est que le phyllotherme d'une variété hâtive est différent de celui d'une variété tardive ;
5. la valeur du phyllotherme est essentiellement constante pendant toute la saison de croissance (RICKMAN & KLEPPER, 1991; MOREAU & MARAITE, 1999). Notre hypothèse est que le phyllotherme est différent entre les feuilles de la base et du sommet de la tige ;
6. au Grand-Duché de Luxembourg les variétés semées et l'application de la fumure azotée sont variables d'une région à l'autre. Notre hypothèse est que l'interaction entre le microclimat local et certaines pratiques agricoles (choix variétal, fumure azotée, ...) favorise certaines maladies telles que l'oïdium ;
7. au moins deux traitements fongicides sont appliqués au Grand-Duché de Luxembourg pendant la croissance du blé d'hiver. Le raisonnement de la protection des plantes contre les maladies se base sur des stades définis à l'avance. Notre hypothèse est que l'application d'un seul traitement fongicide au moment optimum apportera une rentabilité économique aussi ou plus important qu'un double traitement appliqué sur base de stades définis aléatoirement;

Cette thèse sera subdivisée en deux grandes parties :

1. La première partie concerne l'épidémiologie des principales maladies observées au Grand-Duché de Luxembourg et la compréhension des paramètres micro-météorologiques qui catalysent ces épidémies.
2. La deuxième partie concerne la simulation de la croissance des feuilles ainsi que la calibration et la validation des principales maladies affectant la culture du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

1-1 : Comparaison entre les différents systèmes d'avertissements situés dans les pays limitrophes du Grand-Duché de Luxembourg.....	12
---	----

## FIGURES

1-1 : Le triangle a représenté les interactions entre la plante, l'agent pathogène et l'environnement (météo).....	6
1-2 : Diagramme décrivant les fonctions pouvant être affectées par un parasite cryptogamique de feuille.....	6
1-3 : Schéma montrant l'objectif principal du modèle d'avertissement à concevoir au Grand-Duché de Luxembourg.....	9
1-4 : Principales étapes d'ajustement de Proculture via le Web.....	12

## REFERENCES

- AMAND, D., F. CALAY, L. COQUILLART, T. LEGAT, B. BODSON, J.-M. MOREAU & H. MARAITE (2003). "First detection of resistance to Qol fungicides in *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat in Belgium." *Comm. Appl. Biol. Sci.* **68 (46)** i: 519-532.
- AYRES, P. G. (1991). Growth responses induced by pathogens and other stresses. Responses of plants to multiple stresses. New York, eds H.A. Mooney, W.E. Winner & E.J. Pell. pp. 227-247.
- BASSANEZI, R. B., L. ARMORIN, A. B. FILHO, B. HAU & R. D. BERGER (2001). "Accounting for photosynthetic efficiency of bean leaves with rust, angular leaf spot and anthracnose to assess crop damage." *Plant Pathology* **50**: 443-452.
- BOOTE, K. J., J. W. JONES, J. W. MISHOE & R. D. BERGER (1983). "Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions." *Phytopathology* **73**: 1581-1587.
- BROWN, J. K. M., G. H. J. KEMA, H. R. FORRER, E. C. P. VERSTAPPEN, L. S. ARRAIANO, P. A. BRADING, E. M. FOSTER, P. M. FRIED & E. JENNY (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.
- BRYSON, R. J., N. D. PAVELEY, W. S. CLARK, R. SYLVESTER-BRADLEY & R. K. SCOTT (1997). "Use of in-field measurements of green leaf area and incident radiation to estimate the effects of yellow rust epidemics on the yield of winter wheat." *European Journal of Agronomy* **7**: 53-62.
- CALAY, F., L. COQUILLART, C. LUCAS, D. LEMAIRE, B. BODSON, J. M. MOREAU & H. MARAITE (2002). Lessons from year 2001 *Mycosphaerella graminicola* epidemic on winter wheat in Belgium. Meded Rijksuniv. Gent Fak. Landbouwk. Toegep. Biol. Wet. **67 (2)**. 197-204.
- DE JESUS JUNIOR, W. C., F. X. R. DO VALC, R. R. COELHO, B. HAU, L. ZAMBOLIN & A. B. FILHO (2001). "Effects of angular leaf spot and rust on yield loss of *Phaseolus vulgaris*." *Phytopathology* **91**: 1045-1053.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., S. GIOSUC, L. MUNK, A. C. NEWTON, R. E. NIKS, H. OSTERGARD, J. PONS-KUHNEMANN, V. ROSSI & I. SACHE (2000). "Evaluation de paramètres épidémiologiques et leur utilisation dans les épidémies et les modèles de prédiction de maladies de céréales aéroportées." *Agronomie* **20**: 715-727.
- DELOS, M., D. CARON, A. PENAUD, B. NAIBOR & A. FAURE (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". 2<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur les moyens alternatifs de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux. Lille. 04-07 mars 2002. pp. 14-22.
- FILHO, A. B., S. M. T. P. G. CARNEIRO, C. V. GODOY, L. ARMORIN, R. D. BERGER & B. HAU (1997). "Angular leaf spot of Phaseolus Beans : relationships between disease, healthy leaf area and yield." *Phytopathology* **87**: 506-515.
- GARRY, G. (1996). Incidence de l'anthracnose à *Mycosphaerella pinodes* sur la synthèse des assimilats carbonés et azotés du pois protéagineux (*Pisum sativum* L.) et leur transfert vers la graine : conséquences sur la formation et le remplissage des graines. Thèse de doctorat. Université de Rennes 1.
- GAUNT, R. E. (1995). "The relationship between Plant Disease severity and yield." *Ann. Rev. Phytopathol.* **33**: 115-144.
- GOODING, M. J., J. P. R. E. DIMMOCK, J. FRANCE & S. A. JONES (2000). "Green leaf area decline of wheat flag leaves : the influence of fungicides and relationship with mean grainweight and grain yield." *Ann. Appl. Biol.* **136**: 77-84.
- GOODING, M. J., J. P. R. E. DIMMOCK, R. RUSKE, S. PEPLER, K. E. FORD & P. J. GREGORY (2002). The effect of fungicide on the yield and quality of wheat grain. VII Congress of the European Society for Agronomy. Cordoba, Spain. 15-18 July 2002. Book of proceedings (Editors Francisco J. Villalobos and Luca Testi). Consejería de Agricultura y Pesca. Colección : Congresos y Jornadas. ISBN 84-8474-059-5. pp. 441-442.
- IVES, P. M., L. T. WILSON, P. O. CULL, W. A. PALMER & C. HAYWOOD (1984). "Field use of STRATAC : an Australian computer-based pest management system for cotton." *Prot. Ecol.* **6**: 1-21.
- JOHNSON, K. B. (1987). "Defoliation, disease and growth : a reply." *Phytopathology* **77**: 1495-1497.
- JOWETT, D., J. A. BROWNING & B. COURNOYER HANING (1974). Non linear disease progress curves. Epidemics of plant diseases (Fungus 4-8). Epidemics of Plant diseases : Mathematical Analyses and Modeling. New York. J. Kranx, ed. Springer-Verly. pp. 12-77.
- KING, J. E., R. J. COOK & S. C. MELVILLE (1983). "A review of *Septoria* diseases of wheat and barley." *Ann. Appl. Biol.* **103**: 345-373.
- LE MAY, C. (2002). Effet de la structure du couvert végétal du pois protéagineux sur le développement spatio-temporel de l'anthracnose à *Mycosphaerella pinode*. Conséquences sur l'élaboration du rendement. Thèse de doctorat. ENSAR.
- LE ROUX, P., R. DELORME & P. GAILLOARDON (2002). "Evolution des produits phytosanitaires à usages agricoles. II- Les fongicides." *Phytoma - La défense des végétaux* **545**: 8-15.

- LOVELL, D. J., S. R. PARKER, T. HUNTER, D. J. ROYLE & R. R. COKER (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.
- LUPTON, F. G. H. (1972). "Further experiments on photosynthesis and translocation in wheat." Ann. Appl. Biol. **71**: 69-71.
- MADDEN, L. V. & F. W. NUTTER (1995). "Modeling crop losses at the field scale." Canadian J. of Plant Pathology **17**: 124-137.
- MEEUS, P., B. BODSON & J. M. MOREAU (2000). Réflexions pour l'utilisation des produits à base de strobilurines dans les céréales. Fumure et protection phytosanitaire des céréales (Livre Blanc). Gembloux. Éditeurs responsables : A. Falisse et P. Meeus. Département de phytopharmacie et unité de phytotechnie des régions tempérées. **Fongicide (1 à 8)**.
- METCALFE, R. J. & M. W. SHAW (1998). Factors affecting strength of selection for resistance to DMI fungicides in *Septoria tritici*. Pests - Diseases. The 1998 Brighton Conference. Book of Proceeding. pp. 535-540.
- METCALFE, R. J., M. W. SHAW & RUSSEL (2000). "The effect of dose and mobility on the strength of selection for DMI fungicide resistance in inoculated experiments." Plant Pathology **49**: 546-557.
- MOREAU, J. M. & H. MARAITE (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. & H. MARAITE (2000). "Development of an interaction decision-support system on a web site for control of *Mycosphaerella graminicola* in winter wheat." Bulletin OEPV/EPOQ **30**: 161-163.
- NEY, B., B. TIVOLI & M. O. BANCAL (1998). Effets des agents pathogènes sur le fonctionnement de la plante et des populations cultivées. Modélisation de leur nuisibilité. Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales. Paris (France). 20-21 janvier 1998. Ed. INRA, Paris, 2000 (Les colloques). INRA. **93**. pp. 481-496.
- NIRENBERG, H. I. (1981). "Differenzierung der Erreger der Halmbrechkrankheit. 1. Morphologie." Journal of Plant Diseases and Protection **88**: 241-248.
- RABBINGE, R. & F. H. RIJSDIJK (1984). Epidemiological and crop physiological foundation of EPIPPE in cereal production. London. Butterworths. E.J. Gallagher, ed. pp. 227-235.
- RAPILLY, F. (1991). Epidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. Epidémiologie en pathologie végétale. L. T. Doc. Paris. Institut National de la Recherche Agronomique INRA. ISBN 2-7380-0297-8. 317 p. pp. 240-261.
- RAPILLY, F. & E. JOLIVET (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.
- RICKMAN, R. W. & B. KLEPPER (1991). "Environmentally driven cereal crop growth models." Ann. Rev. Phytopathol. **29**: 361-380.
- ROBERT, C. (2003). Etude et modélisation du fonctionnement d'un couvert de blé attaqué par le complexe parasitaire *Puccinia tritica* - *Mycosphaerella graminicola*. Thèse de doctorat. INRA, Paris-Grignon, 137 p.
- SAMUELS, G. J. & I. C. HALLETT (1983). "*Microdochium stoveri* and *Monographella stoveri*, new combinations for *Fusarium stoveri* and *Micronectriella stoveri*." Transactions of the British Mycological Society **81(3)**: 473-483.
- SCHOLES, J. D., P. J. LEE, P. HORTON & D. H. LEWIS (1994). "Invertase : understanding changes in the photosynthetic and carbohydrate metabolism of barley leaves infected with powdery mildew." New Phytologist **126**: 213-222.
- 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. & D. J. ROYLE (1989a). "Airborne inoculum as a major source of *Septoria tritici* (*Mycosphaerella graminicola*) infections in winter wheat crops in the U.K." Plant Pathology **38**: 35-43.
- SHAW, M. W. & D. J. ROYLE (1989b). "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. & D. J. ROYLE (1993). "Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) on winter wheat in the U.K." Plant Pathology **42**: 882-899.
- SKIDMORE, A. M. (1993). "Les applications fractionnées à doses réduites doivent être abandonnées !" Perspectives agricoles **185**: 119-124.
- STATEC (2001). "Aspects de l'Agriculture en 2000." Bulletin du Statec XXXXVIII. N°3/2001. Le recensement agricole 2000: 32 p.
- STEVA, H. (1993). "Les doses réduites font le jeu des populations résistantes." Perspectives agricoles **185**: 112-118.
- THOMAS, M. R., R. J. COOK & J. E. KING (1989). "Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its affect on yield." Plant Pathology **38**: 246-257.
- WAGGONER, P. E. & R. D. BERGER (1987). "Defoliation, disease and growth." Phytopathology **77**: 393-398.
- WALLWORK, H. & B. SPOONER (1988). "*Tapesia yallundae* - the teleomorphe of *Pseudocercospora herpotrichoides*." British Mycological Society **91**: 703-705.
- WEBER, G. E., GULEC. & J. KRANZ (1994). "Interactions between *Erysiphe graminis* and *Septoria nodorum* on wheat." Plant Pathology **43**: 158-163.
- ZADOKS, J. C. (1971). "Systems analysis and the dynamics of epidemics." Phytopathology **61**: 600-610.
- ZADOKS, J. C. & F. H. RIJSDIJK (1984). Agro-ecological atlas of cereal growing in Europe. Atlas of cereal diseases and pests in Europe. Vol. 3. 169 p.
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG & C. F. KONZAK (1974). "A decimal code for the growth stages of cereals weeds." Research **14**: 415-421.

---

## CHAPITRE I

### MÉTHODOLOGIE DE CHOIX DES SITES D'ESSAI

---

Le choix du site est une étape indispensable pour la mise en place d'un système d'avertissement au Grand-Duché de Luxembourg. Pour ceci, il est important de choisir des régions céréalières à saisons contrastées. Notre préférence pour ces sites caractérisés par des variations des grandeurs topoclimatologiques s'explique par notre objectif d'établir des liaisons quantitatives entre les changements biologiques d'état (contamination, latence, ...) modulés par le parasite et le peuplement hôte. Ces sites d'essai représentent les principales régions céréalières du Grand-Duché de Luxembourg et reflètent les grandes variations topoclimatologiques du Gutland.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les caractéristiques pédoclimatiques des sites d'essai qui ont été choisis pour la réalisation de cette recherche doctorale.

---

## I. Introduction

De nos jours, bien qu'on mette en oeuvre un arsenal considérable de moyens de protection de nature chimique et biologique, certaines maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver constituent toujours une des causes importantes de pertes. Pour pouvoir mettre en oeuvre des méthodes de control adéquat contre une maladie, il faut, d'une part déterminer le degré de son importance à l'échelle de la région et son effet sur la variation du rendement et d'autre part comprendre les facteurs épidémiologiques qui favorisent cette maladie.

Ainsi, la majorité de nos expérimentations dans le cadre de cette thèse ont eu pour objectifs d'acquérir les connaissances nécessaires sur les principales maladies cryptogamiques des feuilles de blé au Grand-Duché de Luxembourg pour l'élaboration d'un système d'avertissement.

## II. Matériels et méthodes

### II.1. Choix des sites d'essai

Pour atteindre les objectifs fixés par cette thèse, les expérimentations ont été réalisées dans des champs d'essai. Ceux-ci doivent d'une part, être représentatifs de l'ensemble des régions céréalières du Grand-Duché de Luxembourg et d'autre part, permettre de préciser l'importance régionale de chaque maladie. Cependant, cette question de choix des champs d'essai est très délicate et se heurte à un ensemble de contraintes qui sont :

- La grande diversité de topoclimats liés à une multitude de paramètres physiogéographiques (pente, exposition, type de sol, occupation du sol, etc.) ;

- Dans une même région donnée, des secteurs exposés potentiellement à des écoulements catabatiques. Ces écoulements ont en effet une grande influence sur les écarts importants de température et d'humidité relative du fait de l'accumulation de couches d'air froid dans les dépressions topographiques en cas de déficit radiatif prononcé;
- La définition du point le plus représentatif au sein d'une région. Il faut tenir compte des différences entre un site qui est situé dans un plateau et l'autre dans une cuve ;
- Les limitations techniques dans le nombre de sites pour avoir un échantillonnage représentatif de l'ensemble des régions céréalières du Grand-Duché de Luxembourg.

Ainsi, grâce à la collaboration de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA), du CRP-Gabriel Lippmann et surtout du Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück, nous avons sélectionné un ensemble de critères pour le choix de nos sites d'essais qui sont :

- Avoir un site représentatif de chaque grande région céréalière du Grand-Duché de Luxembourg. Ces sites choisis se situent tous dans un plateau du fait que la culture du blé d'hiver est majoritairement semée sur des plateaux au Grand-Duché de Luxembourg ;
- Ces sites devraient disposer de caractéristiques climatiques différentes pour caractériser l'importance régionale de chaque maladie ;
- La proximité entre le site d'essai et une station météorologique horaire pour l'élaboration du modèle d'avertissement ;
- La possibilité de répéter la culture proche du même site chaque année et avec le même agriculteur ;
- L'accessibilité par la route pour effectuer les observations des maladies ;
- La collaboration de l'agriculteur et la mise à disposition de moyens techniques pour la réalisation des essais ;

Enfin, du fait qu'aucune quantification de la maladie n'a été établie avant l'initiation de cette thèse et vu le nombre important d'échantillons à quantifier, nous avons opté pour trois sites qui répondent parfaitement aux critères de choix énoncés ci-dessus et qui sont :

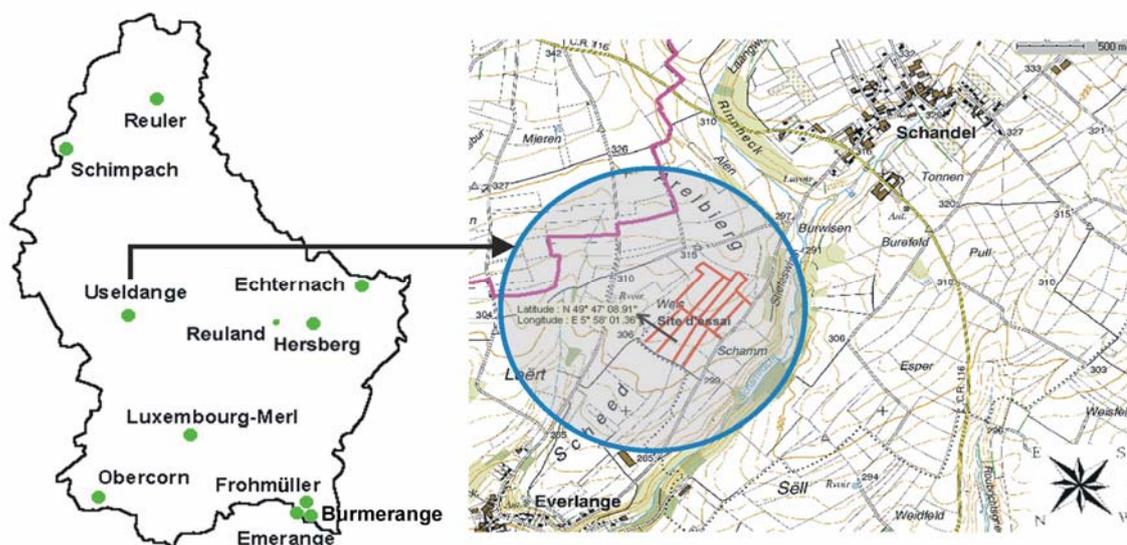
- Everlange qui se situe à proximité d'une station météorologique et où la majorité de l'infrastructure technique a été assurée par le Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück ;
- Reuland (Reuland en 2000 et 2001, Christnach en 2003) et la Moselle (Froh Müller en 2000, Emerange en 2001 et Burmerange en 2003) où les travaux techniques ont été assurés par les agriculteurs qui cultivaient le champ en collaboration avec le Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück.

## **II.2. Situation géographique des sites d'essais**

Les trois sites d'essais se trouvent tous dans la moitié sud du Grand-Duché de Luxembourg appelé Gutland.

## II.2.1 . Everlange

Le site d'Everlange se situe dans une des principales régions céréalières du Grand-Duché de Luxembourg appelée Redange-sur-Attert (16 601 ha de surface agricole utilisée (STATEC, 2001)). Il se trouve à mi-chemin entre Everlange et Schandel (carte 1-1-1). Son périmètre est approximativement de 1480.7 m et sa surface de 101 067 m<sup>2</sup>.



Carte 1-1- 1 : Situation géographique du site d'essai d'Everlange.

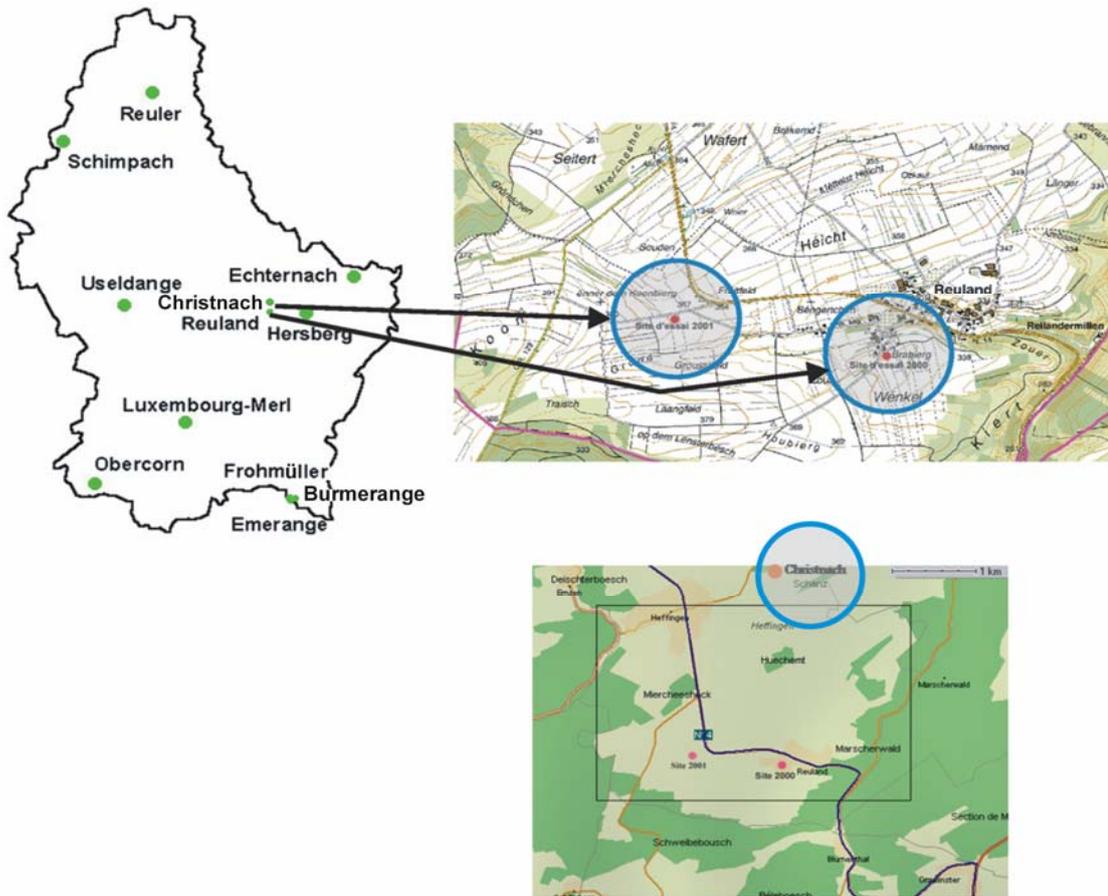
## II.2.2. Reuland

Reuland se situe au centre du Grand-Duché de Luxembourg entre Mersch et Echternach. Les surfaces agricoles utilisées sont de 10 192 ha pour Mersch et 10 139 ha pour Echternach en 2000 (STATEC, 2001) et le blé d'hiver constitue la céréale la plus représentée au niveau de cette région (STATEC, 2001).

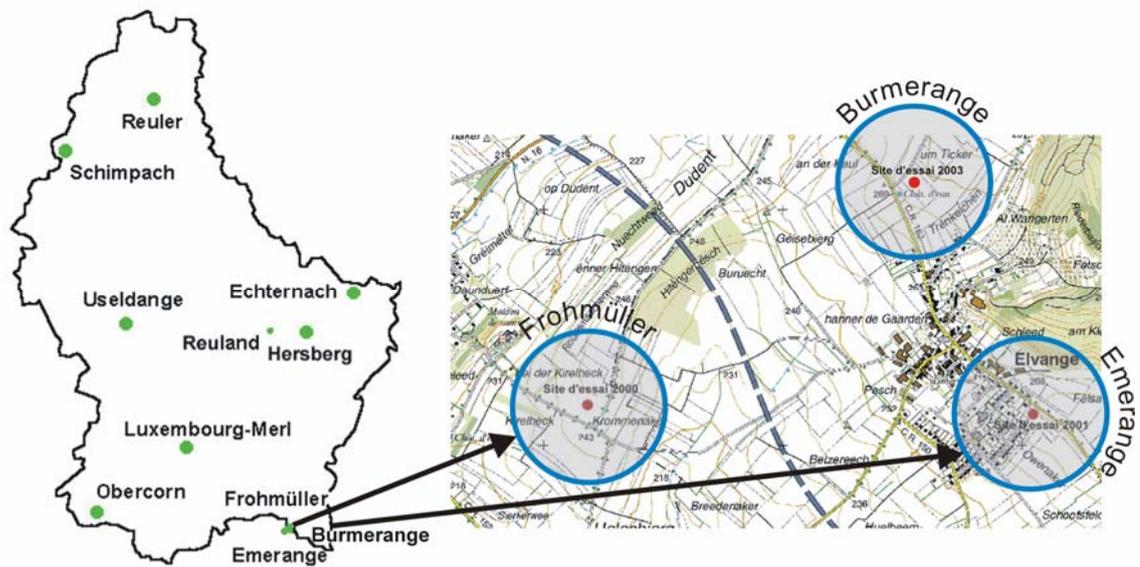
L'altitude du site d'essai est approximativement de 343,2 m et la surface de 6 029 m<sup>2</sup>. Vu l'alternance de culture, deux emplacements des sites d'essai au niveau de Reuland ont été sélectionnés pour l'année 2000 et 2001 (carte 1-1-2). Le site Christnach qui a été choisi en 2003, se situe à une distance de moins de 4 Km de Reuland.

## II.2.3. Moselle

Cette région se situe au sud de la Moselle à l'extrême sud du Grand-Duché de Luxembourg (carte 1-1-3). Cette région aussi est considérée à vocation agricole (photo 1-1-1). Les trois sites d'essai de cette région (Frohmüller, Emerange et Burmerange) sont distants de 2 Km.



Carte 1-1- 2 : Situation géographique du site d'essai à Reuland en 2000 et 2001.



Carte 1-1- 3 : Situation géographique des sites d'essais dans la Moselle pendant l'année 2000 et 2001.



Photo 1-1- 1 : Vue générale des parcelles d'essai dans la Moselle luxembourgeois en 2000 et 2001.

## II.3. Caractéristiques pédologiques des sites d'essais

### II.3.1. Analyse pédologique

#### A. Méthodologie d'échantillonnage

La collecte d'échantillon du sol a été faite le 19 juin 2000 à Frohmüller et le 28 février 2001 à Everlange, Reuland et Emerange. Cette collecte a été réalisé au niveau de quatre parties de champ (a, b, c et d) (figure 1-1-1).

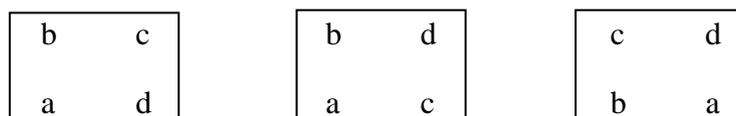


Figure 1-1- 1 : Emplacement de la collecte d'échantillons de sol au niveau des trois sites d'essai.

Dix prélèvements de sol ont été effectués à l'aide d'une tarière pour chaque partie de champ par horizon de 20 cm jusqu'à 60 cm (0-20, 20-40, 40-60 cm) sur une surface de 4 m<sup>2</sup>. Les échantillons de chaque profondeur sont ensuite bien mélangés dans un seau. Deux sous-échantillons frais de 200 g chacun ont été ensuite prélevés de ce mélange et conservés dans une chambre froide à 4°C pour une durée maximale d'un jour pour éviter la décomposition de la matière organique. Les analyses granulométriques et chimiques des échantillons ont été effectuées par le laboratoire de contrôle et d'essais appartenant au Service de Pédologie de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture.

### II.3.2. Analyse chimique

Ces analyses chimiques ont été réalisées le 19 juin 2000 à Frohmüller, pour vérifier si la variation entre deux blocs (Bloc 1 situé dans la marge du champ et le bloc 2 situé à l'intérieur du champ) n'est pas due à une variation de la composition chimique du sol.

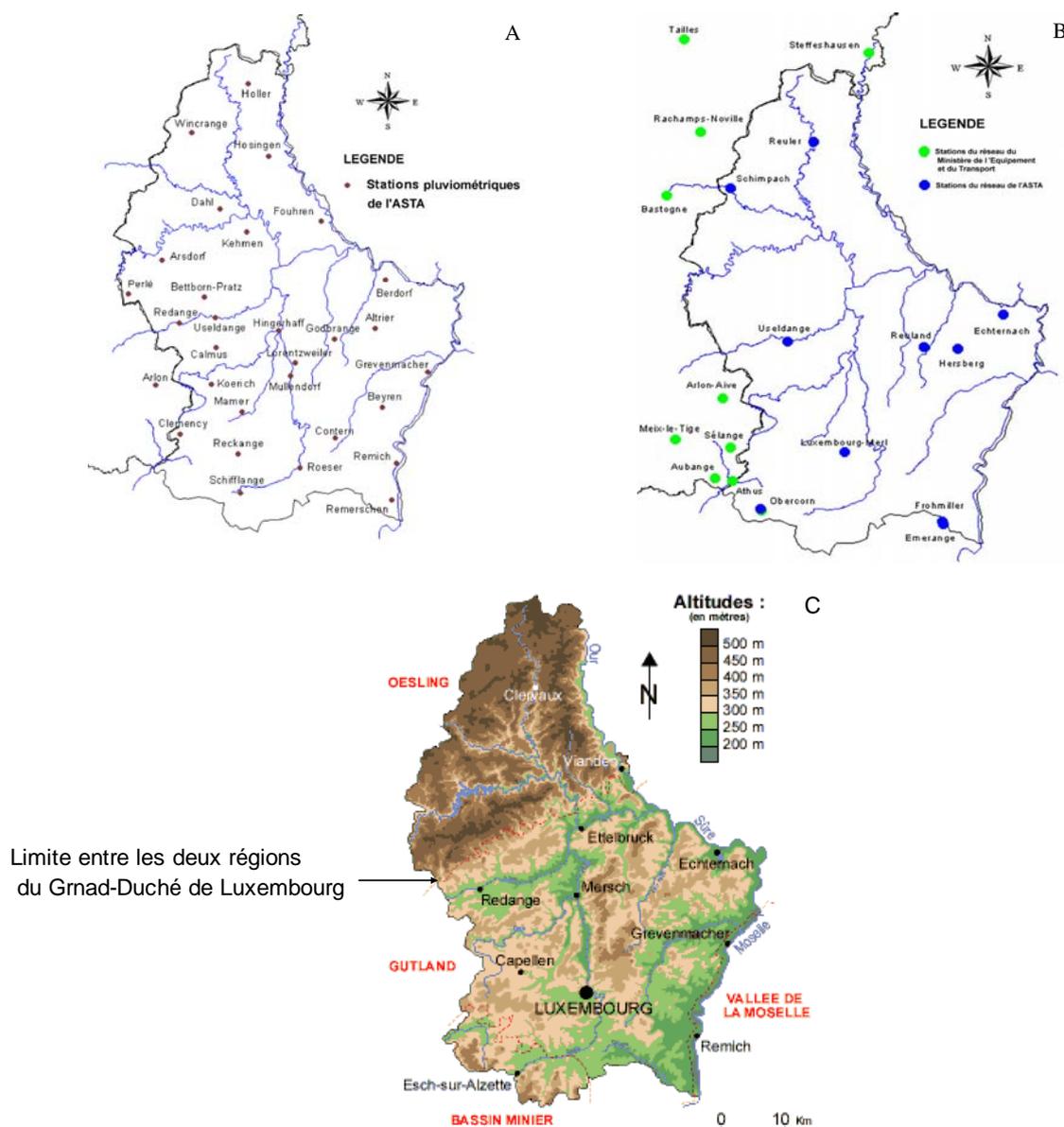
Cependant, en 2001, ces analyses chimiques ont été généralisées à l'ensemble des trois sites d'essai à la sortie de l'hiver (28 février 2001) pour déterminer les propriétés ainsi que la dose de nutrition azotée à apporter aux champs.

En 2003, les informations sur le type de sol ont été fournies par la Chambre d'Agriculture Luxembourgeoise.

## II.4. Caractéristiques climatiques des sites d'essai

Pour déceler les variations climatiques au Grand-Duché du Luxembourg, nous avons réalisé une étude d'interpolation par la méthode « Inverse Distance Weight » (IDW) (ARNAUD & EMERY, 2000). Trois paramètres météorologiques (pluie, humidité relative et température) ont fait l'objet de cette étude.

Nous avons calculé un ensemble d'indices en utilisant les données pluviométriques journalières de l'Administration Technique de l'Agriculture (ASTA) entre l'hiver 1999 et printemps 2000 (carte 1-1-4 A) et les données météorologiques horaires du réseau automatique de l'ASTA en 2001-2002 et celles du Ministère de l'Équipement et des Transports de la Région Wallonne (carte 1-1-4 B).



Carte 1-1-4 : Répartition des stations pluviométriques (A) et automatiques (B) de l'ASTA. La carte C représente les différentes altitudes des deux régions du Grand-Duché de Luxembourg (Gutland et Oesling). Les points verts représentent les stations du réseau du Ministère de l'Équipement et des Transports de la Région Wallonne.

Ces indices ont pour objectif de visualiser les variations climatiques entre les différentes régions du Grand-Duché du Luxembourg. Nous avons calculé trois indices : a) le premier concerne la variation du cumul de la pluie et le nombre de jours sans pluie sur l'ensemble de territoire luxembourgeois entre l'hiver 1999 et le printemps 2000 ; b) le deuxième concerne la variation de l'humidité relative et de la température sur l'ensemble du territoire luxembourgeois pendant l'hiver 2001-2002 en utilisant le réseau automatique de l'ASTA ; et c) le troisième concerne la combinaison entre les facteurs météorologiques (le nombre d'heures avec pluie et température inférieure à 0°C entre le 16 octobre et le 21 mars 2002 ; le nombre d'heures avec pluie, une humidité relative supérieure à 80% et la température comprise entre 4 et 18°C du 1<sup>er</sup> mai au 15 juin 2002).

Par le calcul de ces différents indices, nous visons à déterminer les contrastes qui pourraient exister entre les sites d'essai pendant l'hiver et en printemps pendant la croissance du blé d'hiver.

### III. Résultats et discussion

#### III.1. Analyse granulométrique

**Tableau 1-1- 1 : Résultats de texture du sol dans les sites d'essais.**

Année	Site	Profondeur	% argile <0,002	% total limon	% total sable
2000	Frohmlüller	0-20	43	50	7
		20-40	52	45	5
		40-60	53	40	6
	Emerange	0-20	46	46	8
		20-40	46	48	7
		40-60	48	46	6
2001	Everlange	0-20	21	42	37
		20-40	30	39	31
		40-60	39	34	27
	Reuland	0-20	13	42	44
		20-40	18	46	36
		40-60	20	42	39

L'expression «texture du sol» renseigne sur la taille prédominante ou la gamme de taille des particules de sol d'une manière qualitative et quantitative. Qualitativement, elle réfère au «touché» du matériau sol qu'il soit grossier et rugueux ou fin et moelleux. Quantitativement, la texture du sol décrit les proportions relatives des diverses tailles des particules d'un sol donné (HILLEL, 1984).

Au niveau d'Everlange et Reuland, le sol est plus sableux qu'à Emerange et Frohmlüller. Ces derniers sites sont caractérisés par des sols lourds avec un taux élevé en argile et limon (tableau 1-1-1).

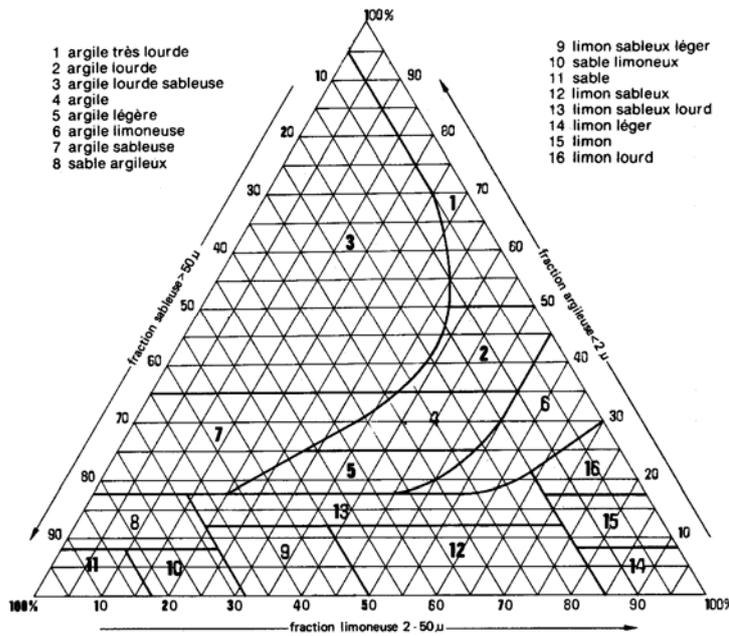


Figure 1-1-2 :

Texture triangulaire montrant les pourcentages d’argile (<math>< 0.02 \text{ mm}</math>), de limon (0.002-0.005 mm) et de sable (0.05-2 mm) dans les classes fondamentales de texture du sol (JAMAGNE, 1967).

La désignation texturale complète ou classe est déterminée sur la base des rapports de masse des trois fractions (% argile <math>< 0.002 \text{ mm}</math>, % total limon, % total sable). L’appellation du sol a été déterminée avec le diagramme triangulaire de JAMAGNE (1967) (figure 1-1-2).

0 – 20 cm	Argile légère	Limon sableux lourd	Argile lourde	Argile lourde
20 – 40 cm	Argile	Argile légère	Argile lourde	Argile lourde à très lourde
40 – 60 cm	Argile lourde sableuse	Argile légère	Argile lourde	Argile lourde à très lourde
	Everlange	Reuland	Emerange (2001)	Froh Müller (2000)

Figure 1-1-3 : Variation de la texture du sol dans les trois sites d’essais.

La texture a été déterminée pour l’ensemble des sites d’essais et pour chaque profondeur, ce qui permet d’établir le profil du sol des trois régions (figure 1-1-3).

Les expressions « léger » et « lourd » sont utilisées dans la conversation courante pour caractériser le comportement physique général des différents sols. Les sols lourds sont les sols argileux qui ont une très grande microporosité retenant l’eau pratiquement en permanence, raison pour laquelle ils sont lourds. A l’inverse les sols sableux sont souvent peu humides car incapables de conserver l’eau pluviale.

En 2003, l’analyse granulométrique faite par la Chambre d’Agriculture dans les sites d’essais a révélé un sol marneux avec texture lourde à Christnach et un sol argilo-limoneux à Burmerange.

### III.2. Analyse chimique

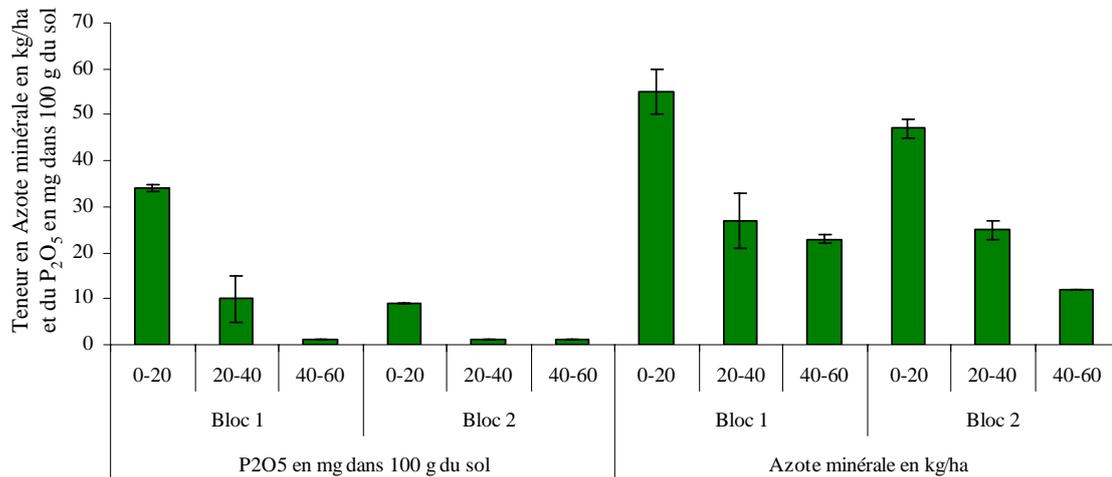
En 2000, à Frohmüller, le pH était neutre dans les deux blocs (tableau 1-1-2). La différence se remarque bien pour la teneur en  $K_2O$ . Cependant, la différence entre les deux blocs du même champ est nettement remarquable en fonction de la profondeur pour  $P_2O_5$  et l'azote minéral (figure 1-1-4).

La teneur de ces deux éléments est très importante dans le bloc 1 par rapport au bloc 2.

Cette variation de teneur de ces deux éléments pourrait avoir un effet sur la variation de la hauteur des plantes entre les deux blocs.

**Tableau 1-1- 2 : Variation de la teneur de certains éléments chimiques du sol à Frohmüller en 2000.**  
Légende des classes : A = très basse ; B = basse ; C = bonne ; D = élevée ; E = très élevée.

Bloc	Profondeur	pH CaCl <sub>2</sub> /acetat	$K_2O$ en mg dans 100 g de sol		Mg en mg dans 100 g de sol		Na en mg dans 100 g de sol	
			Moyenne	Classe	Moyenne	Classe	Moyenne	Classe
Bloc 1	0-20	6.6	26	C	9	B	2	A
	20-40	6.8	6	A à B	8	A à B	2	A
	40-60	7	11	A	4	A	3	B
Bloc 2	0-20	6.9	22	B	5	A	2	A
	20-40	7.1	12	A	3	A	2	A
	40-60	7.2	6	A	2	A	2	A



**Figure 1-1-4 : La teneur en azote minéral en kg N/ha pour une profondeur de sol de 20 cm et du phosphore ( $P_2O_5$ ) à Frohmüller en 2000.**

Le phosphore et l'azote sont deux facteurs limitant pour la croissance de la plante et c'est un élément de fertilisation indispensable pour la culture.

En 2001, l'écart de la teneur en azote minéral entre Emerange et les deux autres sites est très important (tableau 1-1-3). Cet écart est probablement dû à une application très précoce de l'azote par l'agriculteur. En Moselle luxembourgeoise, les agriculteurs ont tendance à appliquer une forte dose de la fumure azotée avant la fin de février. Cette tendance chez les agriculteurs est justifiée par la texture des sols qui sont très lourds et la nécessité d'une première dose importante pour relancer la culture.

**Tableau 1-1-3 : Variation de la teneur de certains éléments chimiques du sol dans les trois sites d'essais en 2001.**

Site	Profondeur en cm	pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Mg	Na	N minéral
En mg dans 100 g de sol							
Everlange	0-20	6,4	29	29	13	1,5	10,5
	20-40	6,5	14	24	14	1	8,5
	40-60	6,4	6	21	26,5	2	9,5
Reuland	0-20	6,3	19	16	6,5	1	4,3
	20-40	6,5	9	14	7	1,5	6
	40-60	7	3	10	6	2	4
Emerange	0-20	7	13	26	7	1	179
	20-40	7	3	16	5	1	42
	40-60	7	1	8	3	1	44

### III.3. Analyse des résultats d'interpolation des paramètres météorologiques

#### III.3.1. Pluviométrie

##### A. Cumul de la pluie

Cette étude (figure 1-1-5 A1) montre que pendant l'hiver 1999, l'Oesling (cf. La carte 1-1-1 C pour les limites des deux régions du Grand-Duché de Luxembourg) est beaucoup plus arrosé que le Gutland, la différence du cumul de pluie peut atteindre plus de 200 mm par saison. Cependant, au printemps et une partie de l'été 2000 (figure 1-1-5 B1), c'est le Gutland qui est plus arrosé que l'Oesling. Il est important de rappeler que la majorité des surfaces emblavées par la culture du blé d'hiver se trouve dans le Gutland. C'est la partie située à l'extrême Sud-ouest du territoire luxembourgeois qui est caractérisée par une forte pluviométrie hivernale. En revanche, la Moselle et le Nord-est du Gutland sont caractérisés par un régime pluviométrique hivernal le plus faible du territoire luxembourgeois.

##### B. Jours sans pluie

Le nombre de jours sans pluie (figure 1-1-5 A2) pendant l'hiver 1999 est très faible dans l'extrême Sud de la Moselle et au Nord-est du Gutland. Or, ces zones sont

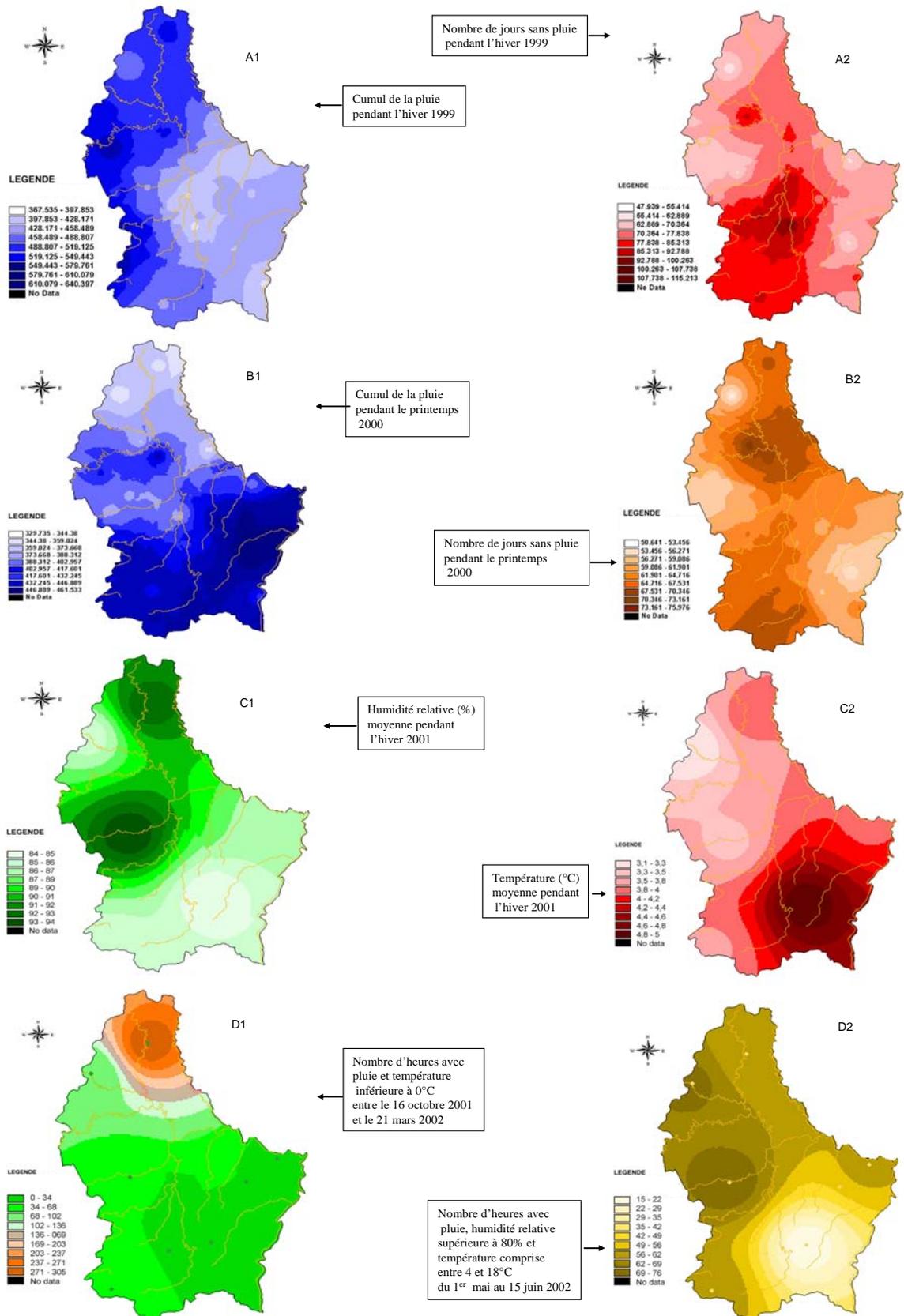
caractérisées par le plus faible cumul de pluie, ce qui signifie qu'il y pleut souvent mais avec une intensité très faible. Le nombre de jours sans pluie est très important en Gutland par rapport à celui en Oesling. Le Gutland est caractérisé par plus de beau temps en hiver que l'Oesling. Au printemps 2000 (figure 1-1-5 B2), il pleuvait souvent à l'Est du Gutland et dans la Moselle (le nombre de jours sans pluie est faible et le cumul de la pluie est assez important dans ces deux parties). Les zones du Sud du pays entre la Moselle et l'Ouest du pays sont caractérisées par un nombre important de jours sans pluie, alors que le cumul de pluie était assez important, ce qui signifie que cette région a été caractérisée par une forte pluie orageuse pendant cette saison, de même que le centre et le nord du Gutland. L'Oesling a été caractérisé par plus de beau temps que le Gutland pendant le printemps et une partie de l'été 2000. En somme, ce premier indice montre de grands contrastes en ce qui concerne la pluie entre les sites d'essai de la Moselle par rapport à ceux du Nord du Gutland et Reuler (Nord-est de l'Oesling) qui ont été sélectionnés en 2003.

### III.3.2. Humidité relative et température en 2001

Le Gutland est moins humide (figure 1-1-5 C1) et plus ensoleillé (figure 1-1-5 C2) pendant l'hiver que l'Oesling, surtout dans le Sud-est de la Moselle. Le Nord-ouest du Gutland est caractérisé par une plus forte humidité du pays semblable à celle de l'extrême Nord du pays et une température plus faible. L'extrême Nord de l'Oesling est caractérisé par le maximum d'heures avec pluie et température inférieure à 0°C ; c'est la partie la plus froide, humide et pluvieuse du pays pendant l'hiver. Le nombre d'heures avec pluie et température inférieure à 0°C peut atteindre 305 heures (figure 1-1-5 D1). La différence entre le Gutland et l'Oesling concernant cet indice est remarquable. Cependant, le Nord-ouest du Gutland est caractérisé par une forte humidité en hiver, des températures de l'ordre de 3°C en moyenne et un nombre d'heures avec pluie et température inférieure à 0°C situé entre 34 et 68. La Moselle et ses environs sont caractérisés par la plus faible humidité du pays et une température élevée ainsi qu'un nombre d'heures avec pluie et température inférieure à 0°C très faible pendant l'hiver 2001-2002. C'est également la région la plus ensoleillée du pays.

### III.3.3. Interaction pluie, humidité et température

La Moselle et le centre du Gutland sont caractérisés par le plus faible nombre d'heures humides avec pluie et une température comprise entre 4 et 18°C entre le 1<sup>er</sup> mai et le 15 juin 2002 (figure 1-1-5 D2). Cependant, la région du Nord-ouest du Gutland (Everlange) a présenté le plus important nombre d'heures humides (pluie et une température comprise entre 4 et 18°C entre le 1<sup>er</sup> mai et le 15 juin 2002). Cette différence entre les différentes régions du Grand-duché de Luxembourg pourrait être à l'origine d'une variation du potentiel des maladies cryptogamiques entre ces différentes régions du pays. Ceci sera vérifié avec les maladies observées au Grand-Duché de Luxembourg entre 1999 et 2003.



**Figure 1-1-5 : Résultats de l'interpolation de trois paramètres (humidité relative, pluie et température) sur l'ensemble du territoire luxembourgeois.**

## IV. CONCLUSION

Le choix des sites d'essai exprime les principales situations sol-climat rencontrées au Grand-Duché de Luxembourg pour la culture de blé d'hiver. Notre étude sur les variations de trois paramètres météorologiques (humidité, pluie et température) et leur interaction a révélé des contrastes très importants entre les sites d'essais.

Le Grand-Duché de Luxembourg est un petit pays d'une superficie de 2586 km<sup>2</sup> mais avec des caractéristiques pédo-climatiques très variables entre les différentes régions de ce pays. L'objectif est de vérifier dans cette thèse si ces différents microclimats sont à l'origine d'une variation du potentiel de la maladie entre les différentes régions du Grand-Duché de Luxembourg.

L'interaction entre les conditions météorologiques et les pratiques agricoles de chaque région du Grand-Duché de Luxembourg pourrait varier le degré de certaines maladies et favoriser le développement régional pour d'autres telles que l'oïdium et les rouilles.

Ces hypothèses seront vérifiées lors de l'étude des conditions favorisant les principales maladies qui seront quantifiées au Grand-Duché de Luxembourg.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

1-1-1 : Résultats de texture du sol dans les sites d'essais.....	I-7
1-1-2 : Variation de la teneur de certains éléments chimiques du sol à Frohmüllen en 2000. ....	I-9
1-1-3 : Variation de la teneur de certains éléments chimiques du sol dans les trois sites d'essais en 2001.....	I-10

## FIGURES

1-1-1 : Emplacement de la collecte d'échantillons de sol au niveau des trois sites d'essai. ....	I-5
1-1-2 : Texture triangulaire montrant les pourcentages d'argile (< 0.02 mm), de limon (0.002-0.005 mm) et de sable (0.05-2 mm) dans les classes fondamentales de texture du sol.....	I-8
1-1-3 : Variation de la texture du sol dans les trois sites d'essais. ....	I-8
1-1-4 : La teneur en azote minéral en kg N/ha pour une profondeur de sol de 20 cm et du phosphore (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) à Frohmüller en 2000.....	I-9
1-1-5 : Résultats de l'interpolation de trois paramètres (humidité relative, pluie et température) sur l'ensemble du territoire luxembourgeois.....	I-12

## PHOTOS

1-1-1 : Vue générale des parcelles d'essai dans la Moselle luxembourgeois en 2000 et 2001. ....	I-5
---	-----

## CARTES

1-1-1 : Situation géographique du site d'essai d'Everlange.....	I-3
1-1-2 : Situation géographique du site d'essai à Reuland en 2000 et 2001. ....	I-4
1-1-3 : Situation géographique des sites d'essais dans la Moselle pendant l'année 2000 et 2001.....	I-4
1-1-4 : Répartition des stations pluviométriques (A) et automatiques (B) de l'ASTA. La carte C représente les différentes altitudes des deux régions du Grand-Duché de Luxembourg (Gutland et Oesling). Les points verts représentent les stations du réseau du Ministère de l'Équipement et des Transports de la Région Wallonne. ....	I-6

## REFERENCES

HILLEL, D. (1984). L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Louvain-La-Neuve. Cabay. 288 p.

JAMAGNE, M. (1967). "Bases et techniques d'une cartographie des sols." Ann.Agro. **18:** (n° hors série) 142 p.

STATEC (2001). "Aspects de l'Agriculture en 2000." Bulletin du Statec XXXXVIII. N°3/2001. **Le recensement agricole 2000:** 32 p.

---

## CHAPITRE II

---

### MÉTHODOLOGIE DE MESURE

---

#### I. Introduction

Les expérimentations ont été réalisées dans les trois sites d'essai décrits dans le chapitre I. Avant de procéder à la réalisation de ces expérimentations, un ensemble de considérations générales méritent d'être signalées à savoir :

- Nous avons été confrontés à une double contrainte. D'une part, il fallait déterminer les paramètres pertinents à mesurer pour l'élaboration du modèle des principales maladies cryptogamiques des feuilles du blé d'hiver étudiées. D'autre part, la difficulté de ce travail est que les observations se font dans les essais en pleine nature et non en conditions contrôlées.
- Notre échantillonnage des plantes doit être représentatif de l'ensemble du champ.
- Les hypothèses de travail ainsi que les paramètres d'ajustements diffèrent entre chaque modèle. Pour certaines maladies à répartition homogène dans le champ (cas de la septoriose), ce sont des quantifications des surfaces foliaires malades et vertes qui doivent être appliquées. Cependant, pour les maladies à foyer telles que les rouilles, des mesures qualitatives concernant le nombre de foyers, leurs dimensions et leurs localisations doivent accompagner les mesures quantitatives de la surface foliaire malade et verte.

Notre choix de méthodologie de mesure a été basé sur les recherches bibliographiques relatives à la modélisation couplée du pathosystème « hôte – parasite – climat ».

Ainsi, tous les paramètres que nous avons tenté de mesurer peuvent contribuer directement ou indirectement à l'explication de développement de certaines épidémies.

La connaissance du moment de l'émergence des cinq dernières feuilles et l'évolution des maladies au sein de ces feuilles sont hautement indispensables pour la mise en place d'un système d'avertissement en pathologie végétale. Ces données serviront à complexifier la modélisation du système « plante-parasite » en couplant le développement réel de la maladie à l'émergence des cinq dernières feuilles. Les modèles couplés constituent un des seuls moyens de comprendre et de prédire de façon réaliste les effets des agents pathogènes sur le rendement (JOHNSON & TENG, 1990). On peut s'interroger sur les modalités de couplage : peut-on coupler deux modèles élaborés indépendamment l'un de l'autre ou est-il nécessaire d'avoir identifié les variables de couplage avant la conception de chacun des modèles ? Il est en effet nécessaire de clairement distinguer l'interfaçage de deux modèles qui permet de les réunir par l'intermédiaire d'un nombre très limité de variables. Le couplage constitue une véritable question de recherche et de modélisation. Dans cette optique, il est nécessaire d'avancer dans la progression mécaniste du peuplement végétal et des épidémies afin d'aboutir à un couplage dynamique du système (MADDEN & NUTTER, 1995 *in* ROBERT, 2003).

Les essais ont été suivis pendant cinq années successives, ce qui constitue une grande base de données pour le Grand-Duché de Luxembourg qui ne possédait aucune archive

de maladies du blé d'hiver. En outre, ces données d'observation seront utilisées pour l'ajustement et la calibration de modèles relatifs aux principales maladies affectant le feuillage du blé d'hiver. Ce dernier point constitue une des originalités de ce travail. Dans la littérature, les auteurs calibrent leur modèle en se basant sur des conditions contrôlées et se focalisent sur la simulation seulement après afin de décrire l'évolution de la sévérité de la maladie dans le champ.

## **II. Matériels et méthodes**

### **II.1. Choix du protocole expérimental**

Notre protocole expérimental a été variable pendant les cinq années (1999 à 2003) de recherche (tableaux 1-2-1 et 1-2-2) dans les quatre sites d'essais (Everlange, Moselle, Reuland et Reuler). Ce travail de recherche a débuté en juin 1998-1999. A cette période, nous avons profité des essais réalisés à Everlange par le Lycée Technique Agricole pour avoir les premières informations sur les principales maladies détectées dans ce site.

Pour ceci, nous avons choisi quatre catégories d'essais qui sont :

- Des essais combinant la variation du régulateur de croissance et deux moments d'application de fongicide (GS59, 2 traitements, témoin) appliqué sur la même variété Flair. Cet essai correspond au BLOC A dans le tableau 1-2-1 ;
- Des essais sur l'effet de traitement (2 traitements, GS39, témoin) réalisé sur 5 variétés ; Flair (F), Batis (Ba), Ritmo (R), Sponsor (S), Vivant (V). Ces essais correspondent aux Blocs B, C, D.
- Des essais de l'effet de la variation de doses de fumure azotée sur la variété Urban. Cet essai correspond au Bloc E (tableau 1-2-3).
- Des essais variétaux réalisés sur cinq variétés, Aron (Ar), Bussard (B), Astron (As), Urban (U) et Aristos (Ari). Ces essais correspondent au Bloc F.

Tableau 1-2- 1: Plan expérimental réalisé à Everlange pendant les quatre années d'essais (99, 00, 01 ,02 et 03).

Légende : A- Bloc présentant des essais avec un seul traitement et un double traitement en fonction du régulateur ; Blocs B à D- Essai avec deux doses pleines (B) et avec une dose pleine (C) et sans fongicide (D) ; E- Essai avec des variations de fumure azotée au cours de trois apports (tallage, redressement, épiaison) ; F- Essai variétal sans fongicide ; Nomenclature de variétés- Ac/ Achat, Ar/ Aron, Ari/ Aristos, As/ Astron, Ba/ Batis, Bi/ Biscay, B/ Bussard, D/ Dream, Dr/ Drifter, F/ Flair, R/ Ritmo, S/Sponsor, V/ Vivant, U/ Urban ; V pour traitement = variable ; (+) signifie que ces parcelles ont reçu un surplus de 40 unités d'azote (N). 2 T correspond à deux traitements avec T1 = GS32 (bloc A en 98-99, 99-00, 00-01 et 02-03) et GS32+ pour bloc B et GS31 en 01-02. T2 correspond au traitement GS59.

Blocs			1998-1999						99-00	00-01	01-02	02-03				
			A	B	C	D	E	F				4 oct.	14 oct.	6 nov.		
Semis			9 oct.						15 oct.	18 oct.	12 oct.	4 oct.	14 oct.	6 nov.		
Densité			350 K/m <sup>2</sup>						325	325	350	325	350	375		
Précédent			Colza et petits pois						Colza	Colza	Petits pois	Colza	Colza	Colza		
Variétés			Flair	F, Ba, R, S, V			U	Ar, B, As, U, Ari	B, D, F, R	B, D, F, R	Ac, Bi, Dr	Achat	Achat	Achat		
Répétition traitement			4-V	0-V			0-1	0-0	4-16	4-20	4-20	4-32	4-32	4-32		
Taille parcelle ( m <sup>2</sup> )			8x1.5	33.3x15			8x1.5	33.3x15	8x1.5	8x1.5	8x1.5	8x1.5	8x1.5	8x1.5		
Régulateur	Terpal	Dose	1.5 l/ha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		Date	6 mai	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Modus	Dose	0.4 l/ha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		Date	6 mai	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Cycocel	Dose	-	0.75 l/ha	0.75 l/ha	-	0.75 l/ha	-	0.75 l/ha	0.75 l/ha	0.75 l/ha	0.75 l/ha	0.75 l/ha	0.75 l/ha			
	Date	-	6 mai	6 mai	-	6 mai	-	11 avril	2 avril	11 avril	23 avril	23 avril	23 avril			
Fumure	Tallage	Kg/ha	40				25	40	70	40	40	40	40			
		Date	15 mars				15 mars	10 mars	27 mars	18 mars	20 mars	20 mars	20 mars			
	Redressement	Kg/ha	55	65	50	50	55	60	80	60	60	60	60			
		Date	16 avril				16 avril	12 avril	20 avril	12 avril	18 avril	18 avril	18 avril			
	Epiaison	Kg/ha	75	85	65	65	90	95	80	75	65	65	65			
		Date	7 juin				7 juin	31 mai	9 juin	3 juin	8 mai	8 mai	8 mai			
Calendrier des pulvérisations fongicides réalisées			GS 32	Produit	-	-	-	-	-	-	-	Allegro	-	Opéra		
				Dose	-	-	-	-	-	-	-	-	1 l/ha	-	1.5 l/ha	
				Date	-	-	-	-	-	-	-	-	9 mai	-	5 mai	
			GS37	Produit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Opéra	
				Dose	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5 l/ha	
				Date	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12 mai	
			Model	Stade	-	-	-	-	-	-	-	-	GS39	GS37	GS39	GS37
					Produit	-	-	-	-	-	-	-	Allegro	-	Opéra	
				Dose	-	-	-	-	-	-	-	1 l/ha	-	1.5 l/ha		
				Date	-	-	-	-	-	-	-	19 mai	23 mai	16 mai	23 mai	
			GS39	Produit	-	-	Allegro	-	Allegro	-	-	Allegro	-	Opéra		
				Dose	-	-	1 l/ha	-	1 l/ha	-	-	1 l/ha	-	1.5 l/ha		
				Date	-	-	24 mai	-	24 mai	-	-	31 mai (GS49)	-	20 mai	27 mai	
			GS59	+40 N	-	-	-	-	-	-	-	(+)	-	(+)	-	-
				Produit	Opus team	-	-	-	-	-	-	Allegro	Allegro	Opéra	Horizon	
				Dose	1.5 l/ha	-	-	-	-	-	-	1 l/ha	1 l/ha	1.5 l/ha	1 l/ha	
				Date	3 juin	-	-	-	-	-	-	2 juin	12 juin	29 mai	2 juin	
			2 T	T1	Produit	Allegro	Allegro	-	-	-	-	Opus team	Opus team	Sphère	Sphère	
					Dose	1 l/ha	1 l/ha	-	-	-	-	1.5 l/ha	1.5 l/ha	1 l/ha	1 l/ha	
				Date	6 mai	12 mai	-	-	-	-	4 mai	9 mai	22 avril	5 mai		
				T2	+40 N	-	-	-	-	-	-	-	(+)	-	(+)	-
			Produit		Opus team	Opus team	-	-	-	-	-	Allegro	Allegro	Opéra	Horizon	
			Dose	1.5 l/ha	1.5 l/ha	-	-	-	-	-	1 l/ha	1 l/ha	1.5 l/ha	1 l/ha		
			Date	5 juin	5 juin	-	-	-	-	-	2 juin	14 juin	29 mai	2 juin		
			1/2 dose GS32+1/2 dose GS59	GS32	Produit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sphère	
					Demi dose	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5 l/ha	
				Date	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5 mai	
				GS59	Produit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Horizon	
			Demi dose		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5 l/ha		
			Date	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 juin		
1/2 dose GS37+1/2 dose GS59	GS37	Produit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sphère				
		Demi dose	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5 l/ha				
	Date	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12 mai				
	GS59	Produit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Horizon				
Demi dose		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5 l/ha					
Date	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 juin					
Récolte			29 juillet				3 août	4 août	3 août	13 août	19 juillet					

**Tableau 1-2-2 : Plan expérimental réalisé à Reuland et la Moselle en 2000, 2001 et 2003 et à Reuler dans l'Oesling en 2003.**

Nomenclature de variétés : B/ Bussard, D/ Dream, F/ Flair, R/ Ritmo. 2 T : 2 traitements avec T1 pour Reuland = GS39 en 99-00 et GS32+ en 2001 et GS32 en 2003 ; T1 pour Moselle = GS45 en 99-00 et GS32+ en 00-01 et à GS32 en 02-03 ; T1 pour Reuler = GS32 en 02-03. T2 correspond au GS59.

			Reuland			Moselle			Reuler	
			99-00	00-01	02-03	99-00	00-01	02-03	02-03	
Semis			18 oct.	28 oct.	2 oct.	16 oct.	30 oct.	4 oct.		
Densité			-	-	367	-	-	280	350	
Précédent			Maïs	Maïs	Colza	Maïs	Maïs	Colza	Colza	
Variétés			B, D, F, R	B, D, F, R	Flair	B, D, F, R	B, D, F, R	Dekan	Bussard	
Répétition traitement			4-4	4-4	4-28	3-4	4-4	4-28	4-28	
Taille parcelle ( m <sup>2</sup> )			8x1.5	8x1.5	8x1.5	8x1.5	8x1.5	8x1.5	8x1.5	
Régulateur	Terpal	Dose	-	-	-	-	-	-	-	
		Date	-	-	-	-	-	-	-	
	Modus	Dose	-	-	-	-	-	-	-	
		Date	-	-	-	-	-	-	-	
	Cycocel	Dose	-	-	0.75 l/ha	-	-	0.75 l/ha	0.75 l/ha	
		Date	-	-	20 avril	-	-	20 avril	20 avril	
Fumure	Tallage	Kg/ha	-	-	68	-	-	77	105	
		Date	-	-	15 mars	-	-	28 fév.	10 mars	
	Redressement	Kg/ha	-	-	54	-	-	70	54	
		Date	-	-	8 avril	-	-	4 avril	3 mai	
	Epiaison	Kg/ha	-	-	54	-	-	38	54	
		Date	-	-	15 mai	-	-	10 mai	15 juin	
	Calendrier des pulvérisations fongicides réalisées	GS32	Produit	-	-	Opéra	-	-	Opéra	Opéra
			Dose	-	-	1.5 l/ha	-	-	1.5 l/ha	1.5 l/ha
Date			-	-	5 mai	-	-	5 mai	12 mai	
GS37		Produit	-	-	-	-	-	-	-	
		Dose	-	-	-	-	-	-	-	
		Date	-	-	-	-	-	-	-	
Model		Stade	-	-	GS45	-	-	GS59	GS59	
		Produit	-	-	Opéra	-	-	Opéra	Opéra	
		Dose	-	-	1.5 l/ha	-	-	1.5 l/ha	1.5 l/ha	
		Date	-	-	27 mai	-	-	27 mai	12 juin	
GS39		Produit	-	-	Opéra	-	-	Opéra	Opéra	
		Dose	-	-	1.5 l/ha	-	-	1.5 l/ha	1.5 l/ha	
		Date	-	-	23 mai	-	-	12 mai	6 juin	
GS59		+40 N	-	-	-	-	-	-	-	
		Produit	-	-	Horizon	-	-	Horizon	Horizon	
		Dose	-	-	1 l/ha	-	-	1 l/ha	1 l/ha	
		Date	-	-	6 juin	-	-	27 mai	12 juin	
2 T		T 1	Produit	Opus team	Opus team	Sphère	Opus team	Opus team	Sphère	Sphère
			Dose	1.5 l/ha	1.5 l/ha	1 l/ha	1.5 l/ha	1.5 l/ha	1 l/ha	1 l/ha
			Date	23 mai	9 mai	5 mai	23 mai	9 mai	5 mai	12 mai
		T 2	+40 N	-	-	-	-	-	-	-
			Produit	Allegro	Allegro	Horizon	Allegro	Allegro	Horizon	Horizon
			Dose	1 l/ha	1 l/ha	1 l/ha	1 l/ha	1 l/ha	1 l/ha	1 l/ha
1/2 dose GS32+1/2 dose GS59		GS32	Produit	-	-	-	-	-	-	-
			Demi dose	-	-	-	-	-	-	-
			Date	-	-	-	-	-	-	-
		GS59	Produit	-	-	-	-	-	-	-
			Demi dose	-	-	-	-	-	-	-
	Date		-	-	-	-	-	-	-	
	1/2 dose GS37+1/2 dose GS59	GS37	Produit	-	-	Sphère	-	-	Sphère	Sphère
			Demi dose	-	-	0.5 l/ha	-	-	0.5 l/ha	0.5 l/ha
			Date	-	-	12 mai	-	-	8 mai	27 mai
		GS59	Produit	-	-	Horizon	-	-	Horizon	Horizon
			Demi dose	-	-	0.5 l/ha	-	-	0.5 l/ha	0.5 l/ha
			Date	-	-	6 juin	-	-	27 mai	12 juin
Récolte			-	16 août	23 July	-	31 July	11 July	5 août	

**Tableau 1-2-3: Schéma présentant spatialement les différentes parcelles du bloc E avec la fumure azotée variable.**

Légende : 0 = représente les parcelles sans aucun apport d'azote ; Les autres chiffres expriment l'unité d'azote qui a été apportée en Kg/ha en trois fractions. Les trois chiffres du haut en bas représentent respectivement les fractions d'azote apportées aux stades tallage, redressement et épiaison.

0	50	50	0	30	0	50	0	30
50	0	50	0	75	50	0	0	75
50	50	0	50	0	0	0	0	75
50	100	0	0	30	100	100	0	100
50	0	100	0	0	100	0	100	100
50	0	0	100	75	0	100	100	100
50	0	0	50	0	0	30	100	0
50	0	50	0	75	0	75	100	100
0	50	0	0	75	0	75	100	100
50	0	50	100	0	0	0	100	100
0	50	50	0	0	100	0	100	0
50	50	50	0	0	0	100	0	100
0	100	100	0	0	0	100	50	0
100	0	100	0	75	100	0	50	50
100	100	0	100	0	0	0	50	50
100	30	0	50	0	0	0	50	50
100	75	0	0	0	50	0	50	0
100	75	0	0	75	0	50	0	50
30	100	0	100	30	100	0	0	100
75	100	100	0	75	100	0	100	0
75	100	100	100	75	0	100	0	0
0	50	0	0	50	50	50	0	50
0	0	50	0	50	50	0	50	50
0	0	0	50	65	0	50	50	50

En 2000, à Everlange notre philosophie du protocole expérimental, mentionnée dans les tableaux 1-2-1, 1-2-2 et 1-2-3 était de :

1. Donner plus de priorité à l'ajustement et la calibration d'un modèle de prévision. Pour ceci, quatre variétés [Bussard (B), Dream(D), Flair (F), Ritmo (R)] ont été choisies pour les essais en raison de leur degré de précocité différent.
2. Comparer la réduction de maladie par rapport au témoin de deux traitements (tableaux 1-2-1 et 1-2-2) et un seul traitement réalisé au stade GS59. Chaque variante a été réalisée en quatre répétitions pour chaque variété. Deux autres objets ont été testés au sein des mêmes variétés avec quatre répétitions mais avec en plus 40 unités d'azote.

Pour Reuland et la Moselle, en 2000 comme en 2001, la surface accordée par le Lycée Technique Agricole ne permettait pas de tester plus de deux variantes (témoin et deux traitements) au sein de même type de variété qu'à Everlange (figure 1-2-1).

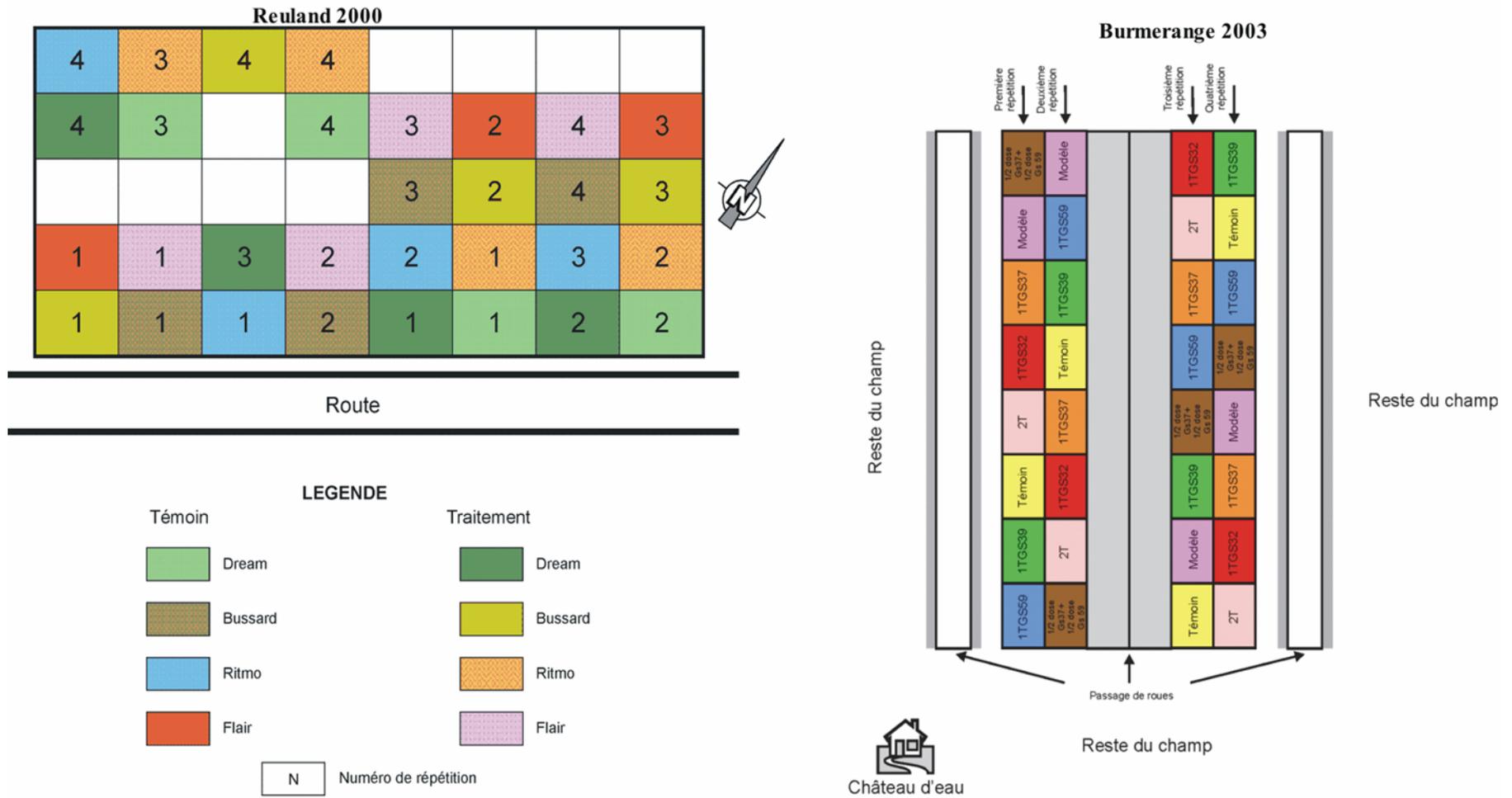
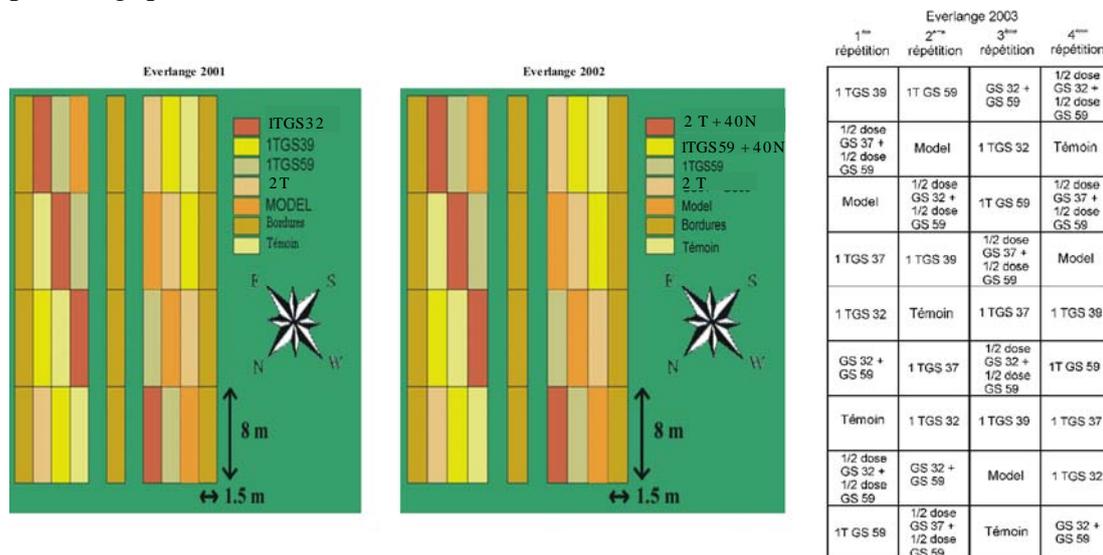


Figure 1-2- 1 : Disposition spatiale des parcelles à Reuland en 2000 et Burmerange en 2003 (bloc aléatoire).

Entre 2001 et 2003, les essais réalisés à Everlange se focalisaient surtout à définir le moment optimum de traitement en se basant sur le modèle qui a été ajusté à partir des données d'observations de l'année 2000. Pour déterminer l'importance du traitement optimum réalisé en se basant sur le modèle, nous avons jugé important de tester les traitements qui se réalisent au Grand-Duché de Luxembourg en se basant sur le stade phénologique.



**Figure 1-2-2 : Représentation spatiale du dispositif expérimental mis en place à Everlange pendant les trois années 2001, 2002 et 2003 (bloc aléatoire). 2T correspond à deux traitements fongicides. 40N = 40 unités d'azote.**

Ainsi, en 2001, en plus de la définition du traitement optimum, des traitements ont été réalisés au stade GS32, GS39, GS59 et GS32+GS59 (2T) en quatre répétitions pour chaque variété (figure 1-2-2). La disposition spatiale a été la même pendant les 3 années 2000, 2001 et 2002. Les seules différences sont :

- A la place de 1TGS32 en 2001 (T = traitement), nous trouvons 2T + 40N (N = Unité d'azote) en 2000 et 2002 ;
- A la place de 1 TGS39 en 2001, nous trouvons 1T+40N en 2000 et 2002.

En 2002, en plus de la détermination du moment optimum du traitement et son efficacité par rapport aux autres traitements réalisés à différents stades du blé, notre philosophie consistait à tester les performances du modèle de prévision qui a été ajusté en 2000 et validé en 2001 sur les nouvelles variétés mises sur le marché luxembourgeois. En 2003, en plus des suivis des maladies dans la Moselle, Useldange et Reuland (Christnach), nous avons réalisé le premier suivi de maladie dans l'Oesling (Reuler) caractérisé par des conditions climatiques très contrastées par rapport au Gutland. Nous avons testé neuf variantes à Useldange (tableau 1-2-1, figure 1-2-2) et huit variantes dans les autres sites (tableau 1-2-2, figure 1-2-1). Ce suivi a été réalisé grâce au projet : « Conception et élaboration d'un système intégré d'avertissement des maladies cryptogamiques du blé d'hiver au Grand-Duché du Luxembourg » coordonné par le CRP-Gabriel Lippmann. Ce projet nous a permis de comparer les traitements réalisés à chaque stade phénologique à partir du stade GS32 ainsi que l'efficacité et la rentabilité des demi-doses de fongicide par rapport aux doses pleines (tableaux 1-2-1 et 1-2-2).

## II.2. Méthodologie de mesure

La majorité de nos mesures ont eu pour objectifs d’acquérir des données nécessaires à l’identification des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d’hiver et à l’élaboration d’un modèle de prévision. Pour ceci, les mesures ont été régulières avec un échantillonnage exhaustif d’une à deux fois par semaine selon les sites. Ces mesures ont été réalisées à partir du tallage jusqu’à la maturité (tableau 1-2-4) et effectuées à la fois sur le terrain et au laboratoire.

**Tableau 1-2-4 : Méthodologie de mesure et de récolte de données dans les trois sites d’essai pendant les trois années d’essai.**

Site	année	Nombre d’objets	Nombre d’observations	Début	Fin	Fréquence		Type de mesure			
Everlange	99	4	4	16 juin	16 juillet	4 pour toute la saison	4/ toute la saison	Formation des feuilles en %	% de la surface foliaire malade des 5 dernières feuilles	Stade phénologique	Rendement en Kg/ha
	00	5	22	16 avril	13 juillet		2 fois par semaine				
	01	6	23	9 avril	19 juillet	3 pour toute la saison	1 fois par semaine				
	02	6	20	20 avril	8 juillet						
	03	9	15	7 avril	14 juillet						
Reuland	00	2	10	20 avril	10 juillet	3 pour toute la saison	1 fois par semaine				
	01	2	13	9 avril	19 juillet						
	03	8	15	7 avril	14 juillet						
Moselle	00	2	10	20 avril	10 juillet	3 pour toute la saison	1 fois par semaine				
	01	2	12	9 avril	9 juillet						
	03	8	15	7 avril	14 juillet						

### II.2.1. Sur le terrain

Dans les champs, avant de procéder à l’échantillonnage, trois niveaux d’observations ont effectués lors de chaque passage :

- La parcelle est d’abord observée dans son ensemble pour chercher une répartition dépendante du travail de l’agriculteur ainsi que des zones reflétant la structure ou la profondeur du sol.

- Ensuite, en se rapprochant des plantes, on recherche les décolorations des feuilles, les changements de couleur, les dessèchements ou l'apparition de colorations foncées intenses.
- Finalement, la troisième phase d'observation est encore plus rapprochée et consiste à rechercher les organes de fructification du champignon à la loupe de poche CARON (1998).

L'intérêt de ce type d'observation est de localiser certaines maladies qui pourraient passer inaperçues (piétin verse, fusariose, ...) si nous nous basons uniquement sur l'échantillonnage. Ainsi, la présence de certaines maladies telles que le piétin verse et la fusariose de la tige et de l'épi ont été signalées lorsqu'elles étaient sporadiques dans les champs mais elles n'ont jamais été quantifiées. En plus, pour l'étude des maladies foliaires aéroportées telles que les rouilles jaune et brune, cette approche est indispensable pour localiser les foyers, leur expansion, etc. Ces maladies ont nécessité un suivi quantitatif et qualitatifs pour caractériser leur sens d'expansion et le développement des différents foyers.

### A. Type d'échantillonnage et fréquence des mesures

Les évaluations de la sévérité d'attaque des champignons cryptogamiques du blé et leur effet sur la sénescence des feuilles ont été réalisées sur un échantillon représentatif de la population hôte. Le nombre d'échantillons récoltés pendant chaque période d'observation est de 40 plantes par objet (10 plantes par parcelle) (tableau 1-2-4) dans les trois sites d'essai et pendant toutes les années d'essai. Ce choix de 10 plantes par parcelle a été basé sur les observations de certains auteurs (LOVELL *et al.*, 1997). La fréquence de mesure était de dix jours en 1998-1999 (observation commencée tardivement au début de juin) et de deux fois par semaine pour les parcelles témoins à Everlange en 2000, 2001 et 2002 afin de mieux évaluer le cycle de base des champignons observés. Cette fréquence était d'une fois par semaine pour les parcelles témoins à Reuland et Emerange en 2000 et 2001. Ces mesures ont été effectuées à partir de la fin du tallage.

### B. Type de mesures

Les mesures qui ont été réalisées sur le terrain pendant les quatre années d'essai sont :

- La hauteur de la plante en cm : cette hauteur a été mesurée à différents niveaux en fonction de sa croissance à savoir entre les nœuds, de la base de la tige jusqu'aux nœuds, de la base de la tige jusqu'à la dernière feuille, de la base de la tige jusqu'à l'épi, les longueurs des feuilles. Ces mesures de hauteur n'ont pas été régulières pour toutes les années. En 1999 et 2000, nous n'avons pas mesuré tous les paramètres cités ci-dessus (seulement la hauteur jusqu'à la base de la dernière feuille et la hauteur jusqu'à la base de l'épi) mais en 2001, tous ces paramètres ont été mesurés.
- Le stade phénologique du blé selon le code décimal de ZADOKS *et al.*, (1974). Ainsi, les principaux stades phénologiques ont été déterminés pendant les campagnes d'observation (tableau 1-2-5).
- Détermination des feuilles émergées et / ou en émergence, soit par la méthode de marquage de la dernière feuille, soit par dissection au laboratoire.
- Identification des symptômes observés à l'aide d'une loupe f.g.8x. La cotation des maladies du feuillage a été réalisée par l'estimation de l'attaque par strate foliaire successive afin de suivre l'évolution et la dynamique de la maladie au

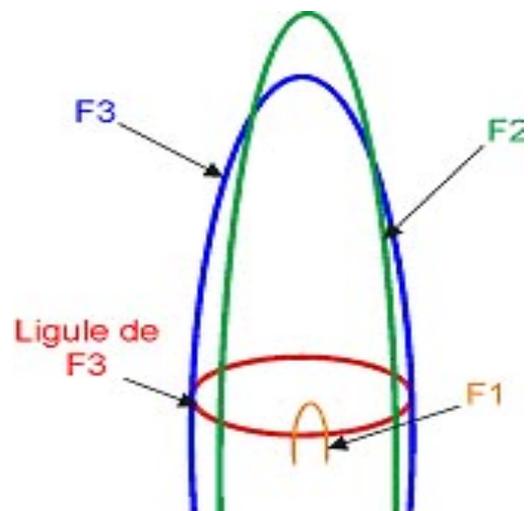
niveau de chaque étage foliaire depuis sa formation jusqu'à sa sénescence (CHIARAPPA, 1981 *in* LOVELL, 1997).

**Tableau 1-2-5 : Signification du stade phénologique de ZADOKS *et al.* (1974).**

Stade selon Zadoks <i>et al.</i> , (1974)	Signification
GS10	Levée
GS21	Début Tallage
GS29	Fin Tallage
GS30	Pseudo-redressement de la tige.
GS31	1 noeud
GS32	2 noeud
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

## II.2.2. Au laboratoire

Les échantillons aléatoires récoltés sur le terrain sont conservés dans la chambre froide à 4°C pendant une journée puis sont analysés au laboratoire à l'aide du stéréomicroscope et du microscope. Cette analyse consiste à estimer le pourcentage de la feuille émergée qui se fait en la comparant à celle qui la précède sachant que l'estimation de cette dernière est déjà faite et en comparant aussi au niveau de la partie basale de la feuille (figure 1- 2-3).



**Figure 1-2-3 :**

**Exemple schématique de la formation des feuilles du blé d'hiver.**

La détermination du numéro de la feuille formée se fait par dissection de la plante. La quantification des maladies observées sur l'ensemble de la surface foliaire (en %) se fait visuellement. Par conséquent, l'observateur est tenu de rester très vigilant et très précis d'autant plus que les données seront utilisées pour paramétrer le modèle d'avertissement.

Pour quantifier la surface foliaire malade nous nous sommes basés sur les échelles de détermination de JAMES (1976) et le logiciel Distrain qui permettent une estimation correcte de la surface présentant des nécroses et des chloroses. L'utilisation de ces deux outils permet d'aboutir à une très bonne précision. Les clefs de détermination

permettent de donner des estimations pour chacune des maladies cryptogamiques des feuilles de blé.

L'identification des champignons cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver a été réalisée via le stéréomicroscope et le microscope. Mais pour certaines maladies telles que les deux rouilles (jaune et brune) et l'helminthosporiose, nous avons travaillé en étroite collaboration avec l'équipe du Professeur Maraite de l'Unité de Phytopathologie de l'UCL pour caractériser les souches de ces champignons.

### II.2.3. Sur ordinateur

Les données météorologiques sont indispensables à l'étude de l'interaction de la plante hôte et du parasite. Cependant, il est intéressant de se demander quelle précision de mesure et quel pas de temps (horaire/journalier) sont nécessaires pour modéliser le fonctionnement du couvert et le développement des épidémies en terme de variables climatiques ?

Faut-il aller jusqu'à mesurer la température de la plante ou peut-on se contenter de celle de l'air ? Dans le cas présent, Les données météorologiques nécessaires à cette modélisation sont mesurées à un pas de temps horaire. Certains paramètres météorologiques, principalement la température, l'humidité et surtout la température qui conditionne l'humidité, deviennent limitant pour l'infection lorsqu'ils dépassent un certain seuil pendant un certain nombre d'heures. Ce seuil dépend de chaque type de parasite.

Une fois les données phénologiques et phytopathologiques récoltées, les données météorologiques horaires sont utilisées dans une base de données pour effectuer les simulations des principales maladies qui ont été quantifiées au Grand-Duché du Luxembourg. Cette partie comprend deux étapes cruciales dans la modélisation :

- La calibration qui consiste à ajuster les données relatives à la formation de la plante hôte et celle des principaux parasites affectant cette plante avec les données météorologiques. Cette phase permettra de définir les paramètres météorologiques qui sont propices à chaque parasite et de proposer un modèle de prévision pour ces parasites ;
- La validation qui consiste à utiliser des techniques statistiques (calcul des occurrences, Anova, Coefficient de détermination, Cross validation, ...) pour déterminer le taux d'efficacité de chaque modèle proposé.

Une fois les différentes simulations réalisées, une étude topoclimatologique doit se faire pour définir l'ensemble des variations qui peuvent influencer telle ou telle épidémie (pente, fond de vallée, exposition nord-sud, ...). La proposition d'une méthode de comparaison entre les différentes situations climatiques permettra une large diffusion des avertissements agricoles lorsque le système sera mis en place.

## III. Discussion

Notre démarche pour le choix des paramètres cités ci-dessus s'explique comme suit :

1. Echantillonnage des plantes : notre échantillonnage a été aléatoire. C'est le caractère aléatoire qui rend probable le fait qu'un échantillon soit représentatif de la population sous-jacente d'où il est issu. Ainsi, à chaque campagne

d'observation, dix plantes ont été prises aléatoirement sur quelques pas le long de chaque parcelle (TOTTMAN, 1987; LOVELL *et al.*, 1997).

2. Hauteur de la plante : Plusieurs auteurs ont mentionné un lien important entre la sévérité de certains champignons cryptogamiques du blé d'hiver tel que *S. tritici* et les deux facteurs "date d'attaque" et "hauteur de la plante" (TAVELLA, 1978 ; LOVELL *et al.*, 1997). Néanmoins, peu de connaissances existent au sujet de la manière avec laquelle la structure des feuilles influence la dispersion de l'inoculum. La mesure de la hauteur est également très importante pour expliquer la dynamique de l'évolution de l'épidémie pour les maladies à gradient de dispersion vertical par les éclaboussures. Ainsi, la hauteur séparant deux feuilles en fonction de leur émergence s'avère nécessaire pour expliquer les processus de contamination des feuilles en général et des feuilles supérieures en particulier (cf. annexe pour les données concernant ce paramètre).
3. Le stade phénologique du blé : cette donnée est la plus importante pour l'ajustement et le calibrage du modèle d'avertissement à la parcelle. L'identification de ces stades de croissance en relation avec l'émergence de chaque feuille est très importante pour déterminer le moment optimum d'application fongicide en fonction de l'intensité de la maladie mais aussi comme référence pour les applications d'herbicides (TOTTMAN, 1977 ; TOTTMAN, 1987 ; RAPILLY, 1991).
4. Pendant les quatre premières années de cette recherche, nous avons réalisé un protocole expérimental avec des variétés choisies présentant des degrés de résistance variable pour telle ou telle maladie. La variété est un élément-clé pour la mise en place d'un système d'avertissement pour la culture du blé d'hiver.
5. En 2003, nous avons réalisé à Everlange un essai avec des dates de semis différentes de la variété Achat. Ce protocole a été réalisé pour déterminer les variations des degrés-jours pour chaque semis.

Les résultats des mesures qui ont été développées dans cette partie consacrée à la méthodologie de notre travail seront analysés en procédant aux étapes suivantes :

1. Analyse des résultats des différentes maladies qui ont été observées pendant les quatre années d'essais et leur importance économique ;
2. Etude du modèle de simulation de la croissance des feuilles en se basant sur l'étude du phyllotherme.
3. Etude du couplage du pathosystème « hôte-parasite-climat » par l'analyse des différents systèmes d'avertissements développés dans les pays limitrophes au Grand-Duché de Luxembourg pour les principales maladies qui seront observées.

Enfin, quatre hypothèses de travail ressortent de ce chapitre :

- Le comportement vis-à-vis d'une maladie diffère d'une variété à l'autre. Deux variétés peuvent présenter le même comportement face à une maladie dans les étages foliaires situés à la base mais un comportement différent pour les étages foliaires du sommet ;
- Un seul traitement fongicide bien positionné donne une rentabilité économique équivalente à deux traitements fongicides ;
- Le phyllotherme est variable entre une variété tardive et une variété hâtive. Ce paramètre varie aussi en fonction des étages foliaires ;
- L'interaction entre les pratiques agricoles et le microclimat favorise l'effet régional de certaines maladies ;

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

1-2-1 : Plan expérimental réalisé à Everlange pendant les quatre années d'essais (99, 00, 01, 02 et 03).....	II-3
1-2-2 : Plan expérimental réalisé à Reuland et la Moselle en 2000, 2001 et 2003 et à Reuler dans l'Oesling en 2003. ....	II-4
1-2-3 : Schéma présentant spatialement les différentes parcelles du bloc E avec la fumure azotée variable. ....	II-5
1-2-4 : Méthodologie de mesure et de récolte de données dans les trois sites d'essai pendant les trois années d'essai.....	II-8
1-2-5 : Signification du stade phénologique de ZADOKS <i>et al.</i> (1974). ....	II-10

## FIGURES

1-2-1 : Disposition spatiale des parcelles à Reuland en 2000 et Burmerange en 2003 (bloc aléatoire).....	II-6
1-2-2 : Représentation spatiale du dispositif expérimental mis en place à Everlange pendant les trois années 2001, 2002 et ..... 2003 (bloc aléatoire). 2T correspond à deux traitements fongicides. 40N = 40 unités d'azote.....	II-7
1-2-3 : Exemple schématique de la formation des feuilles du blé d'hiver.....	II-10

## REFERENCES

- CARON, D. (1998). "Maladies du feuillage du blé. Comment les reconnaître ? La pulvérisation." Perspectives agricoles **234**: 65-72.
- JAMES, W. C. (1976). Manual of plant growth stages and diseases assessment keys. Ministry of Agriculture Fisheries. Food. (sans volume).
- JOHNSON, K. B. & P. S. TENG (1990). "Coupling a disease progress model for early blight to a model of potato growth." Phytopathology **80**: 416-425.
- LOVELL, D. J., S. R. PARKER, T. HUNTER, D. J. ROYLE & R. R. COKER (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.
- RAPILLY, F. (1991). Epidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. Epidémiologie en pathologie végétale. L. T. Doc. Paris. Institut National de la Recherche Agronomique INRA. ISBN 2-7380-0297-8. 317 p. pp. 240-261.
- ROBERT, C. (2003). Etude et modélisation du fonctionnement d'un couvert de blé attaqué par le complexe parasitaire *Puccinia tritica* - *Mycosphaerella graminicola*. Thèse de doctorat. INRA, Paris-Grignon, 137 p.
- TAVELLA, C. M. (1978). "Date of heading and plant height of wheat varieties, as related to *Septoria* leaf blotch damage." Euphytica **27**: 577-580.
- TOTTMAN, D. R. (1977). "The identification of growth stages in winter wheat with reference to the application of growth-regulator herbicides." App. Biol. **87**: 213-224.
- TOTTMAN, D. R. (1987). "The decimal code for the growth stages of cereals with illustrations." Ann. Appl. Biol. **110**: 441-454.
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG & C. F. KONZAK (1974). "A decimal code for the growth stages of cereals weeds." Research **14**: 415-421.

---

**CHAPITRE III****EPIDÉMIOLOGIE DE LA SEPTORIOSE DES FEUILLES DU BLÉ AU  
GRAND-DUCHÉ DU LUXEMBOURG ENTRE 1999 À 2003**

---

La septoriose des feuilles causée par la forme conidienne *Septoria tritici* [Robbins & Desmazières] téléomorphe *Mycosphaerella graminicola* [FUCKEL, SCHROETER] est la principale maladie foliaire affectant la culture du blé d'hiver au Grand-duché du Luxembourg. Cette maladie cause une perte significative du rendement (20 à 30% pour les années à forte septoriose) si la dernière feuille est sévèrement attaquée pendant la maturité du blé ( $r^2 = 0.6$ ,  $P < 0.05$ ).

Les variations de la maladie pendant les saisons 1999 à 2003 sont hautement significatives ( $P < 0.01$ ) en fonction de la tolérance des variétés et des caractéristiques climatiques de 3 régions sélectionnées pour notre étude (Nord de l'Oesling, Nord de la Gutland, Moselle).

---

**I. Introduction**

La septoriose des feuilles causée par *Septoria tritici* [ROBBINS & DESMAZIERES/ (SHIPTON *ET AL.*, 1971), téléomorphe *Mycosphaerella graminicola* [FUCKEL, SCHROETER] (HALAMA, 1996) est un pathogène d'importance mondiale (BROKENSHIRE, 1975 ; EYAL *et al.*, 1985 ; VAN GINKEL & SCHAREN, 1988; EYAL, 1999 ) Cette maladie cause une perte significative du rendement dans beaucoup de surfaces emblavées en culture de blé (KING *et al.*, 1983 ; EYAL *et al.*, 1985 ; ROYLE *et al.*, 1986 ; SHAW & ROYLE, 1989a; ROYLE *et al.*, 1993 ) surtout quand les trois dernières feuilles sont sévèrement attaquées (SHAW & ROYLE, 1989b ; THOMAS *et al.*, 1989).

Les travaux de MAGBOUL *et al.* (1992) ont montré que la septoriose induit une sénescence accélérée sur les feuilles malades. Dans leurs travaux, ces chercheurs quantifient l'accélération de sénescence globale sur la feuille en considérant la sénescence apicale et celle autour des lésions. Cette maladie induit une importante baisse de l'activité photosynthétique foliaire (SHTIENBERG, 1992 ; ZUCKERMAN *et al.*, 1997) et de la transpiration (CORNISH *et al.*, 1990 ; SHTIENBERG, 1992). *S. tritici* détruit les cellules soit lorsque le mycélium pénètre dans celles-ci, soit par l'intermédiaire d'enzymes pectolytiques et cellulolytiques. Elles perdent alors toute capacité à photosynthétiser ou à transpirer (SHTIENBERG, 1992). La baisse de transpiration relative au témoin est réduite de façon proportionnelle à la surface malade (CORNIC & BRIANAIS, 1991 ; SKIDMORE, 1993). En revanche, la diminution de la photosynthèse semble plus que proportionnelle à la surface malade (SHTIENBERG, 1992). Cependant, cette réduction n'a jamais été quantifiée.

Les décisions du moment de pulvérisation contre la septoriose au Grand-Duché de Luxembourg sont souvent faites selon un principe de "précaution" basé sur le stade de croissance de la culture. La culture reçoit au moins deux traitements fongicides pendant la saison.

Du point de vue épidémiologique, des traitements fixés par le stade phénologique sont arbitrairement prévus et ne peuvent donc être couronnés que partiellement de succès. Le risque d'application de fongicides économiquement et écologiquement injustifiables ne peut pas être exclu (VERRET & HOFFMANN, 1990). Dans la littérature, le développement de la sévérité de la maladie sur la dernière feuille (F1) a été associé à la pluie arrivant pendant l'extension de la tige (COAKLEY *et al.*, 1985 ; THOMAS *et al.*, 1989 ; MURRAY *et al.*, 1990 ; SHAW & ROYLE, 1993 ; BANNON & COOKE, 1998).

Parallèlement les résultats de COOK & THOMAS (1990) *in* SHAW & ROYLE (1993), ont montré qu'une application systémique d'un fongicide pendant l'apparition de la dernière feuille (GS39) donnait souvent une réponse de rendement profitable et était plus efficace que des traitements antérieurs ou postérieurs. Ils ont attribué l'efficacité du fongicide au contrôle de *S. tritici*, sans donner d'explication quant au choix du moment optimum pour le contrôle de cette maladie.

L'objectif de ce travail est de réaliser un suivi de *S. tritici* au Grand-duché de Luxembourg pendant les saisons 1999 à 2003 afin de mieux comprendre l'épidémie de cette maladie. En plus de cette étude épidémiologique, nous réaliserons une étude comparative de la rentabilité économique des traitements fongicides effectués à chaque stade phénologique (à partir du stade GS31). Enfin, nous expliquerons l'opportunité de procéder au traitement fongicide en fonction des différentes situations de la maladie.

## II. Matériels et méthodes

Les campagnes d'observations ont débuté en 1999 à Everlange (Nord-Est de la Gutland) et ont été reconduites en 2000 et 2001 dans trois sites d'essais (Everlange, Reuland et Emerange), en 2002 à Everlange et en 2003 dans trois sites (Everlange, Christnach, Burmerange). En 1999, la plate-forme mise en place par le Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück à Everlange a permis de suivre la septoriose sur diverses variétés mises en essai au Grand-Duché de Luxembourg (Vivant, Sponsor, Ritmo, Batis, Flair, Aristos, Urban, Astron, Bussard et Aron). En 2000 et 2001, quatre variétés (Bussard, Dream, Flair et Ritmo) ont été semées en bloc dans les trois sites d'essais cités ci-dessus. Chaque bloc est constitué d'un ensemble de variantes (6 ou 7 selon les années et les sites). Chaque variante correspond à un traitement qui a été réalisé à un stade donné en plus du témoin. Les variantes testées ont été différentes entre l'année 2000, 2001 et 2002. A Reuland et Burmerange, seuls le témoin et deux traitements ont été testés (cf. chapitre II pour plus de détails). En 2002, ce sont les variétés, Achat, Biscay et Drifter qui ont été semées à Everlange. En 2003, les variétés testées sont Achat à Everlange, Flair à Christnach, Dekan à Burmerange et Bussard à Reuler.

L'échantillonnage des feuilles a été réalisé à une fréquence de deux fois par semaine à Everlange et d'une fois par semaine dans les autres sites. A partir de 2003, la fréquence d'échantillonnage a été standardisée à une fois par semaine sur l'ensemble des sites d'essais. La période d'échantillonnage débute souvent début avril et continue jusqu'à un stade tardif de la culture (entre 10 et 19 juillet).

La maladie a été quantifiée selon les échelles de JAMES (1976) et le logiciel Distrain développé par le Ministère de l'Agriculture Américain (TOMERLIN & HOWELL, 1988). En plus de la maladie, nous avons quantifié la surface verte de chacune des cinq dernières feuilles depuis sa formation jusqu'à sa dégradation totale.

Nous avons calculé l'AUDPC (SHANER & FINNEY, 1977) et relative pour une meilleure visualisation de l'évolution de la maladie.

Pour le rendement brut, le calcul se fait sur le terrain par la détermination du poids de grains de chaque parcelle (photo 1-3-1). Des échantillons de grains sont ensuite analysés au laboratoire du Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück pour déterminer le taux d'humidité des grains (TR) à l'échelle de la parcelle. Nous avons calculé ensuite le rendement net (équation 1-3-1) ramené à 15 % d'humidité (le blé d'hiver est commercialisé à 15 % au Grand-Duché de Luxembourg).

$$\text{Rdt net} = (((\text{Rdt brut} - (\text{TR}\% * \text{Rdt brut})) / 0.85) \quad (\text{équation 1-3-1})$$

Avec Rdt net = Rendement net en qx/ha ; Rdt brut = Rendement brut observé en qx /ha ; TR = Taux humidité observé en % ; 0,85 = Taux d'humidité ramené à 15 %.

Ensuite, en se basant sur ce rendement net et les dépenses des différentes variantes testées (prix des différents intrants + passage + prix des semences), il a été possible de calculer le rendement financier de chaque variante selon les prix agréés au Grand-duché du Luxembourg et d'établir ainsi un bilan économique du rendement. Nous avons calculé la différence du rendement net et financier de chaque traitement par rapport au témoin. Enfin, nous avons établi un bilan du pourcentage de gain de chaque traitement réalisé par rapport au témoin.



Photo 1-3- 1 : Différentes phases de la récolte réalisées en collaboration avec le Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück : A- La moissonneuse récolte le blé à l'échelle de chaque parcelle. B - Calcul du poids de grains à la parcelle.

### III. Résultats et discussions

#### III.1. Analyse épidémiologique de la septoriose par site et année

La présentation de nos résultats sera subdivisée en trois parties :

- La description de l'évolution de la maladie pendant les saisons 1999, 2000, 2001, 2002 et 2003;
- La comparaison des variétés selon leur degré de résistance ;
- L'analyse et la compréhension de l'opportunité du traitement par rapport au témoin et en fonction de la tolérance variétale.

### III.1.1. Everlange

#### A. Année 1998-1999

La variation de la septoriose est hautement significative entre variétés ( $P < 0.001$ ). Bussard et Aron étaient significativement les plus sensibles des 5 variétés semées (figure 1-3-1). L'effet du traitement est hautement significatif ( $P < 0.001$ ) lorsqu'on suppose que tous les intrants sont homogènes.

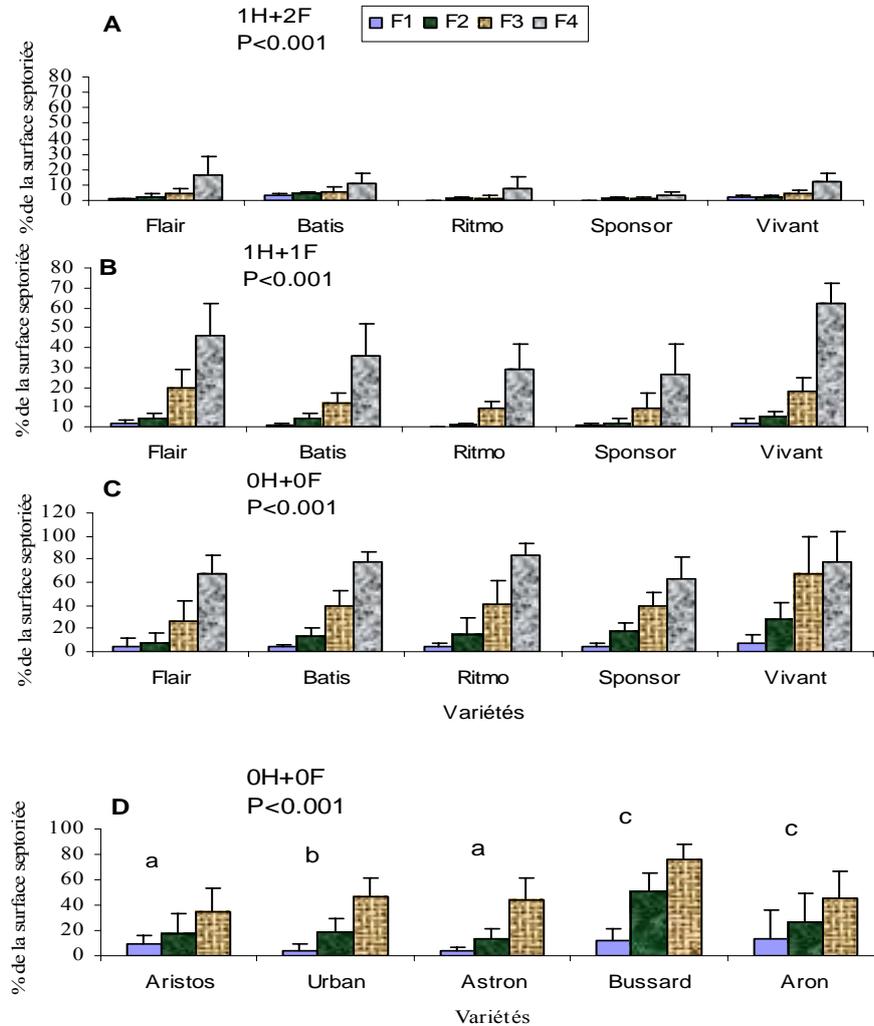


Figure 1-3- 1: Variation de la septoriose en 1999 à Everlange en fonction de variétés pendant la maturité laiteuse (GS72) : A/ 2 traitements, le 1<sup>er</sup> est Allegro (1 l/ha) appliqué le 12 mai 1999, le 2<sup>ème</sup> est Opus Team (1.5 l/ha) appliqué le 5 juin 1999 avec un raccourcisseur Cycocel (0.5 l/ha) appliquée le 20 avril 1999 ;B/ un seul traitement Allegro (1l/ha) appliqué le 24 mai 1999 avec un raccourcisseur Cycocel (0.5 l/ha) appliqué le 20 avril 1999 ;C/ Témoin sans traitement et sans raccourcisseur, D/ Test variétal sans traitement ni raccourcisseur (des lettres minuscules différentes indiquent une différence variétale significative au seuil  $\alpha = 5 \%$ ).

#### B. Années 2000 à 2003

##### B.1. Année 2000

La campagne 2000 fut marquée par l'ampleur exceptionnelle des attaques de septoriose sur les feuilles du blé (figure 1-3-2).

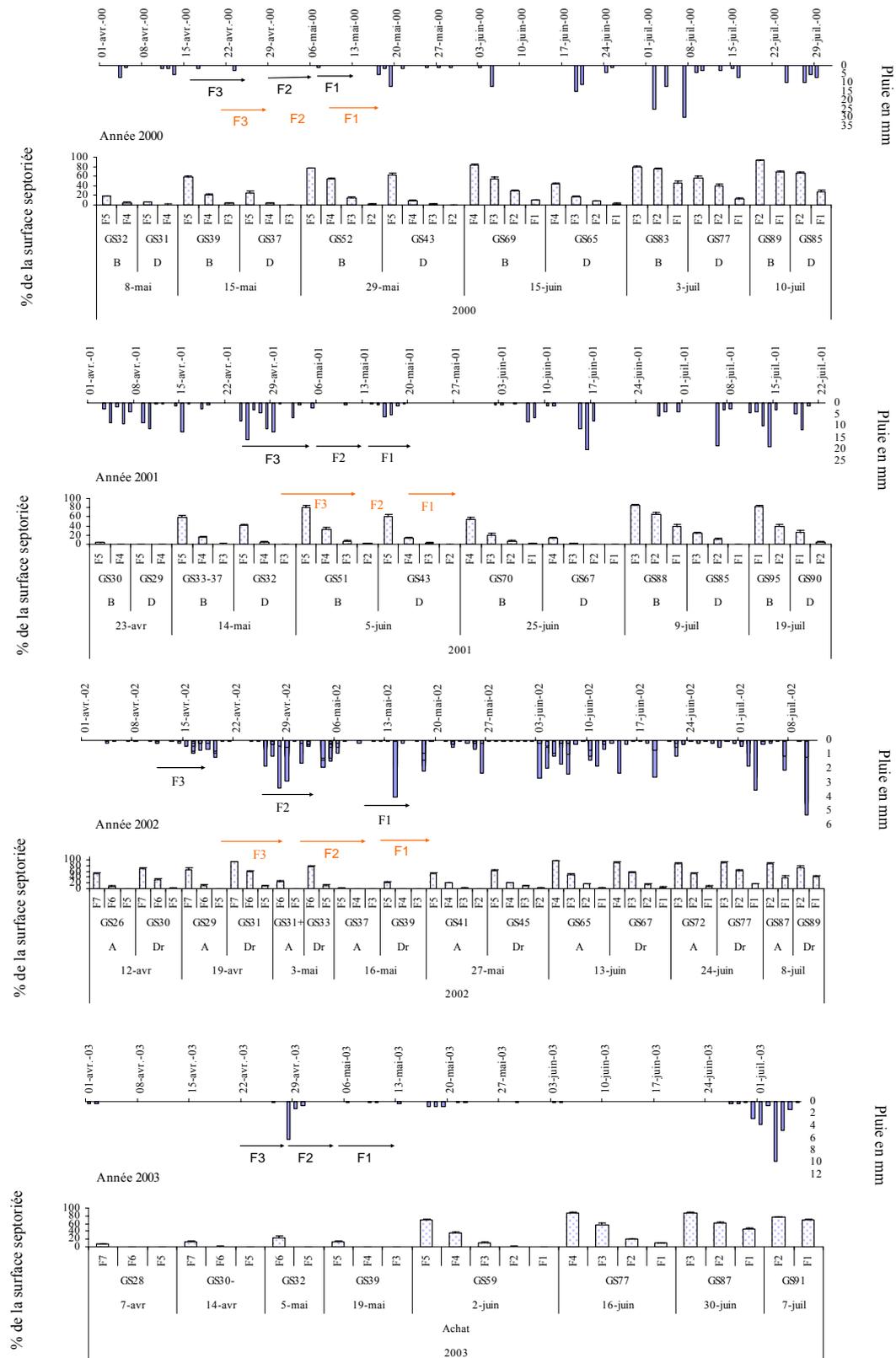


Figure 1-3- 2 : Evolution de la septoriose à Everlange pendant les années 2000, 2001, 2002 et 2003 sur les feuilles du blé en fonction du stade de croissance selon ZADOCKS *et al.*(1974) et les variétés ainsi que la pluie enregistrée pendant ces années. En 2000 et 2001, B et D représentent respectivement Bussard et Dream. En 2002, A et Dr représentent respectivement Achat et Drifter. Les flèches (noir : Bussard en 2000 et 2001 et Drifter en 2002 ; orange : Dream en 2000 et 2001 et Achat en 2002) représentent le moment de formation des trois dernières feuilles.

Des symptômes typiques ont été observables dès le début du mois de mai sur F5 et F4. Les pluies enregistrées à Everlange à partir de la mi-avril ont permis à la maladie de s'installer sur la F3 dès son émergence. Les pluies de la deuxième décennie de mai (figure 1-3-2) ont permis une prolifération rapide de la maladie sur la F3 et une infection primaire des deux derniers étages foliaires supérieurs. C'est ainsi qu'à la floraison, près de la moitié de la surface de F3 de Bussard était souvent nécrosée par la maladie. La colonisation des dernières feuilles F2 et F1 de Bussard a été accélérée à partir du mi juin.

## B.2. Année 2001

Les mois de mars et avril 2001 furent particulièrement pluvieux (figure 1-3-2). Entre fin avril et début mai 2001, la septoriose des feuilles était aussi développée sur les feuilles F5 et F4 que pendant les mêmes mois en 2000. Cependant, le mois de mai a été sec avec un nombre de jours sans pluie fort important.

Ce manque de pluie n'a pas permis le repiquage de la septoriose si bien que les symptômes sur les 2 dernières feuilles étaient très faibles dans les parcelles non traitées durant tout le mois de juin à Everlange (figure 1-3-2).

La maladie a repris son développement vers la fin de la maturité à Everlange sur les variétés susceptibles telle que Bussard.

Pendant les deux années 2000 et 2001, la différence de susceptibilité entre les variétés a été très hautement significative ( $P < 0.001$ ). La susceptibilité de Bussard par rapport à Dream vis-à-vis de la septoriose a été très net et hautement significatif ( $P < 0.001$ ) surtout pour les trois étages supérieurs. La résistance de Dream par rapport à Bussard vis-à-vis de la septoriose se distingue nettement lorsque la feuille est jeune et diminue au fur et à mesure du temps. L'écart de l'AUDPC relative (%) de Dream calculé par rapport à Bussard passe de 88 % lorsque la F3 est jeune à presque 48 % lorsque cette feuille est âgée (figure 1-3-3). Pour F2, cet écart passe de presque 100 % (au début) à 54 %. Concernant F1, cet écart passe de 100 % à 68 %. Cette variation dans l'échelle de résistance prend une allure exponentielle entre le début de la saison et la fin pour F3 et F2 et tend vers la linéarité pour F1.

## B.3. Année 2002

Les premiers symptômes de la maladie ont été détectés le 12 avril 2002 sur la F5 de Drifter (figure 1-3-2). Ces symptômes étaient très négligeables. A cette date, le taux de la maladie sur la F7 de Drifter dépassait 60 % et s'approchait de 52 % sur Achat. Cette feuille était complètement nécrosée lors de l'observation du 19 avril 2002 (92 % sur F7 de Drifter et 67 % sur celle d'Achat) et l'évolution de la septoriose a été significative sur la F6. La première apparition de la maladie sur F5 d'Achat a été enregistrée le 26 avril 2002 (0.3 %). Les pluies de la 2<sup>ème</sup> moitié d'avril (figure 1-3-2) ont permis une progression de la maladie sur F4 et F5. Certains F2 présentaient des symptômes très négligeables au 20 mai 2002. Ces F2 ont été attaquées au début de leur émergence grâce aux pluies du début mai 2002.

Pendant la 2<sup>ème</sup> moitié de mai, très peu de jours de pluie ont été enregistrés mais leur nature orageuse a permis néanmoins une multiplication très significative de la maladie sur la F5, F4, F3 et la F2 et une 1<sup>ère</sup> attaque de F1.

Enfin, les pluies du mois de juin ont favorisé un taux de multiplication très important de la maladie.

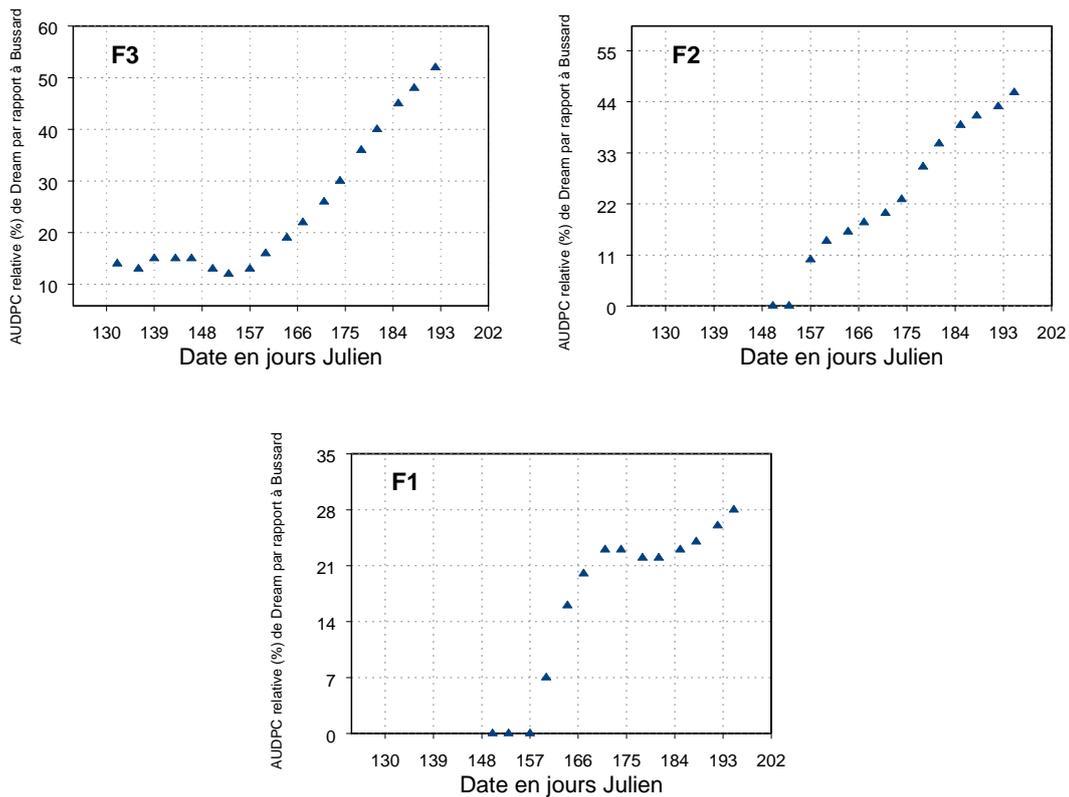


Figure 1-3- 3 : Ecart de l’AUDPC relative de Dream par rapport à Bussard prise comme référence (100%). Exemple à Everlange en 2001.

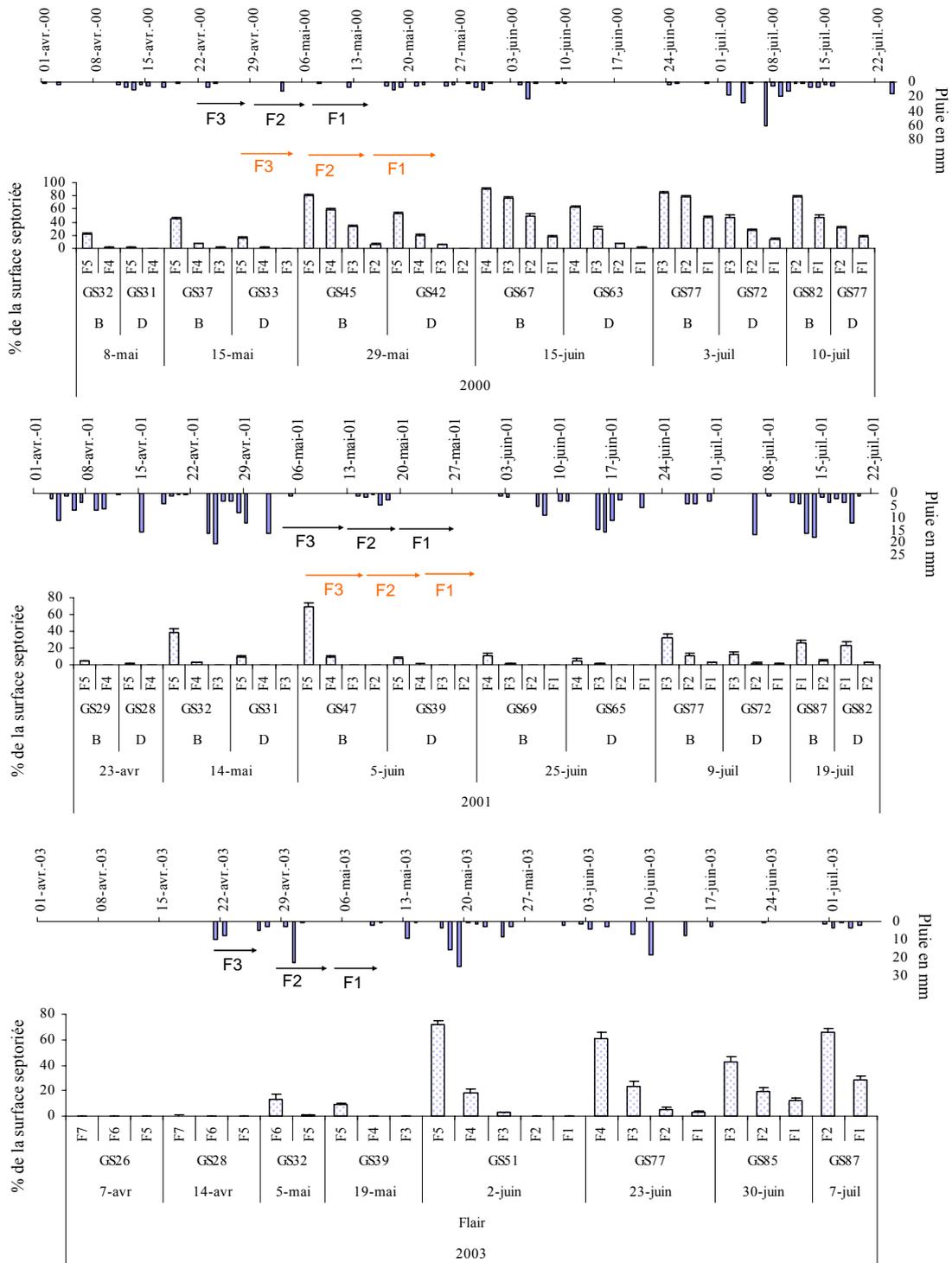
#### B.4. Année 2003

Au 7 avril, le taux de symptômes de *S. tritici* ne dépassait pas 10 % sur la F7 et les F6 et F5 étaient intactes (figure 1-3-2). Les premiers symptômes ont été détectés sur la F6 le 14 avril et sur la F5 le 22 avril (très négligeable). Les pluies de fin avril et début mai (figure 1-3-2) ont été très favorables à la progression de la maladie sur cet étage (observation du 2 juin). La progression de la maladie sur la F4 et la F3 résulte de faibles quantités d’inoculum présents sur la F5 fin avril. Certaines F2 présentaient déjà des symptômes négligeables le 26 mai (0.2 %). La seule explication quant à l’origine de ces symptômes est la présence et la contribution du stade téléomorphe *M. graminicola* [FUCKEL, SCHROETER]. La même explication est valable pour les symptômes très négligeables observés sur la F1 le 2 juin.

Il est important de signaler que le début de la saison 2003 a été marqué par une très faible intensité de la maladie. Cependant les faibles pluies de fin mai et début juin ont favorisé la montée de la maladie et sa progression.

#### III.1.2. Reuland

En 2000, les premiers symptômes ont été détectés sur la F5 et la F4 le 8 mai (figure 1-3-4). Les pluies (figure 1-3-4) du mois de mai ont permis à l’agent pathogène d’atteindre les 3 étages foliaires supérieurs dès leur émergence. Les pluies de fin mai et début juin ont accéléré le taux de multiplication du champignon sur les 3 étages foliaires. Le taux de symptômes enregistré sur les trois derniers étages foliaires de Bussard diffère significativement ( $P < 0.05$ ) de celui de Dream. En effet, Bussard est très susceptible vis-à-vis de la septoriose alors que Dream a un comportement qui tend vers la résistance.



**Figure 1-3- 4 : Evolution de la septoriose à Reuland pendant les années 2000, 2001 et à Christnach en 2003 sur les feuilles du blé en fonction du stade de croissance selon Zadocks *et al.* 1974 et des variétés. En 2000 et 2001, B et D représentent respectivement Bussard et Dream. Les flèches (noir : Bussard ; orange : Dream) représentent le moment de formation des trois dernières feuilles.**

En 2001, les premières traces de la maladie ont été enregistrées sur la F5 le 23 avril. Cependant, les conditions météorologiques du mois de mai (figure 1-3-4) défavorables à la septoriose ont empêché l'expansion de cette maladie sur les trois étages foliaires supérieurs. Ce sont les pluies de la deuxième moitié de juin qui ont permis à ce parasite

d'atteindre les deux derniers étages mais avec un taux très faible même au niveau des variétés susceptibles telle que Bussard.

En 2003, les premiers symptômes ont été observés le 14 avril sur la F7 et le 5 mai sur la F6. L'infection de la F5 n'a été possible que grâce aux pluies de fin avril (figure 1-3-4). La période sèche survenue pendant la première quinzaine de mai a retardé les progressions de la maladie vers les étages foliaires supérieurs. Cette progression n'était possible que pendant la dernière décade de mai et début juin. Cependant, le taux de symptômes enregistré sur les deux derniers étages foliaires reste très faible à la fin de la saison.

### III.1.3. Moselle

En 2000, à Frohmüllen, les premières traces de la septoriose ont été détectées le 08 mai sur la F5 (figure 1-3-5). La F3 a été infectée dès son émergence par l'inoculum présent sur la F5. Les pluies du début de mai ont permis à une quantité d'inoculum faible et dispersé présente sur la F4 d'atteindre la feuille F2 (figures 1-3-5). Les températures très douces de la première quinzaine de mai ont accéléré l'émergence de F1 et la distance entre les feuilles (figure 1-3-6). En plus, les conditions météorologiques pendant la formation de F1 étaient défavorables au parasite. Ceci a rendu difficile voire impossible le transfert de l'inoculum vers la F1. SHAW (1987) a constaté une réduction très importante de spores transportées verticalement par l'éclaboussure à chaque augmentation de la hauteur de 10 cm. La quantité d'inoculum projetée au sommet de la culture par les éclaboussures diminue au moins exponentiellement avec la hauteur (SHAW, 1991; SHAW & ROYLE, 1993).

Le temps sec du mois de juin n'a pas permis aux taux très faibles d'inoculum présents sur la F3 et la F2 de s'étendre sur ces étages. Ce qui explique le taux très faible de symptômes enregistré sur les trois étages foliaires supérieurs même au sein des variétés susceptibles telle que Bussard.

En 2001, les premiers symptômes de la maladie ont été observés à Emerange sur la F5 le 23 avril (figure 1-3-5). A cette date, le taux de maladie sur la F4 de Bussard ne dépassait même pas 0.1 %. Les pluies de fin mars et début avril (figures 1-3-5) ont favorisé l'installation de l'inoculum sur la F5 et la F4 dès leur émergence. Cependant, les quantités d'inoculum faibles et dispersées présentes sur la F5 et la F4 n'ont pu atteindre qu'une fréquence très négligeable de F3.

- Les températures élevées des deux premières décades de mai ont accéléré la croissance de la plante et l'allongement rapide des distances entre les vieilles feuilles situées à la base de la tige et les deux dernières feuilles situées au sommet de la tige. En plus, l'absence de la pluie au début de l'émergence de F2 et pendant toute sa formation (figure 1-3-7) rend difficile, voire impossible l'installation de l'inoculum sur cette feuille.
- L'absence de pluie au moment de l'émergence de F1 et l'absence de symptômes sur la F3 rendent impossible le cheminement de l'inoculum vers cet étage foliaire.

Donc, l'absence de la pluie pendant toute la période de formation de F2 et les températures élevées du mois de mai (ces températures ont accéléré la pleine extension de la tige) ont fortement limité le transport vertical de l'inoculum. D'où l'importance de la relation entre l'architecture de la plante et les conditions météorologiques.

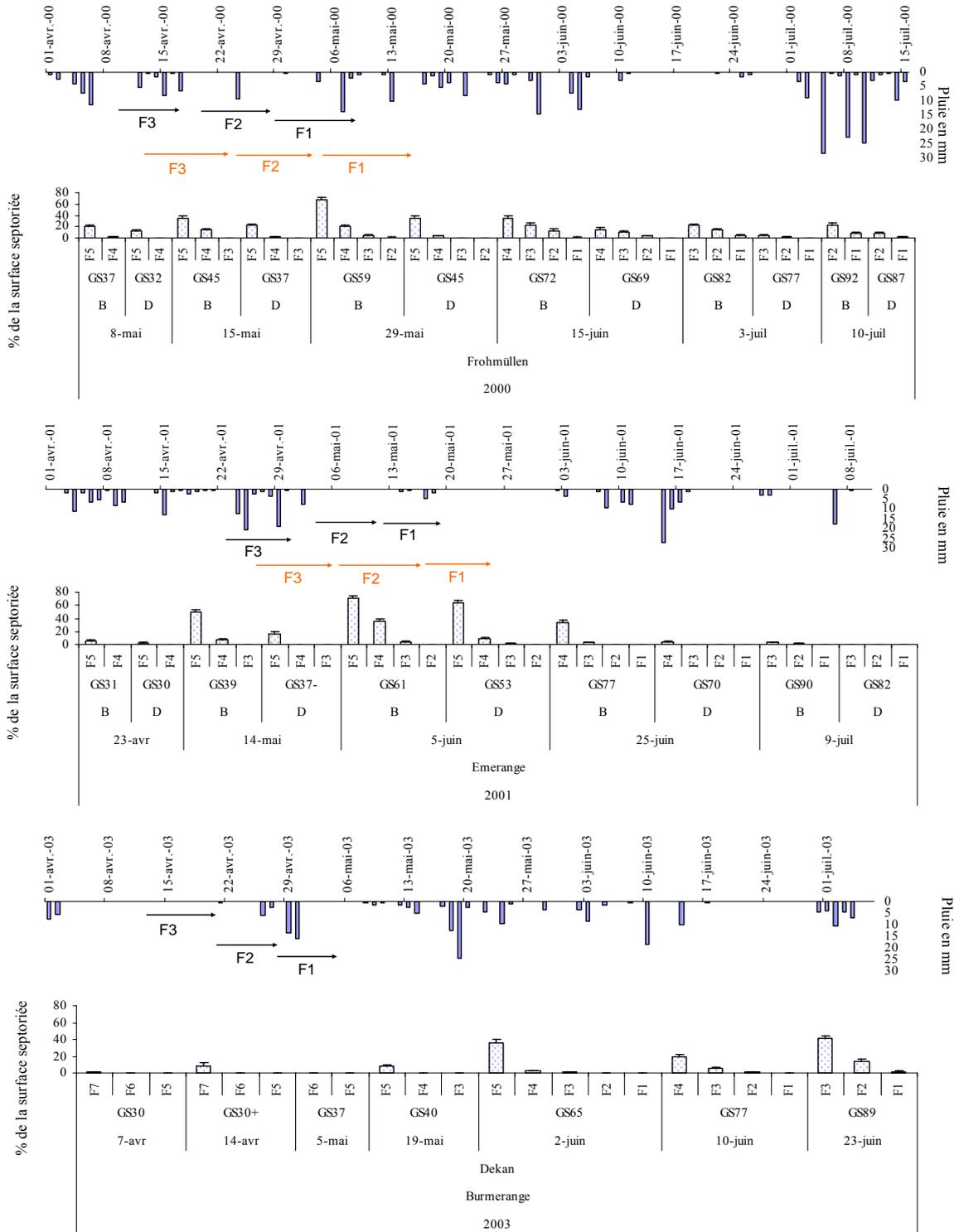


Figure 1-3- 5 : Evolution de la septoriose dans la Moselle pendant les années 2000, 2001 et en 2003 sur les feuilles du blé en fonction du stade de croissance selon ZADOKS *et al.* (1974) et des variétés. En 2000 et 2001, B et D représentent respectivement Bussard et Dream. Les flèches (noir : Bussard ; orange : Dream) représentent le moment de formation des trois dernières feuilles.

En 2003, le taux de symptômes enregistré sur la F7 le 7 avril était très négligeable (figure 1-3-5) ; la F6 et la F5 étaient intactes. Les premières traces de la maladie ont été observées sur la F6 et la F5 le 22 avril (1 % sur la F6 et 0.1 % sur la F5). Le mois

d'avril était sec et doux avec des humidités relatives avoisinant les 30 %. Ces conditions météorologiques étaient défavorables à la progression de la maladie sur la F6 et la F5 et à l'infection de F4. Les pluies de fin avril ont été à l'origine de l'infection de F4 et F3 par l'inoculum très négligeable produit sur la F5. Cependant, des symptômes très négligeables ont été détectés fin mai en même temps sur la F2 et la F1. La seule explication à notre sens est la présence de la forme *M. graminicola* (très négligeable). L'évolution de la septoriose a été très faible sur la F1 en juin et juillet.

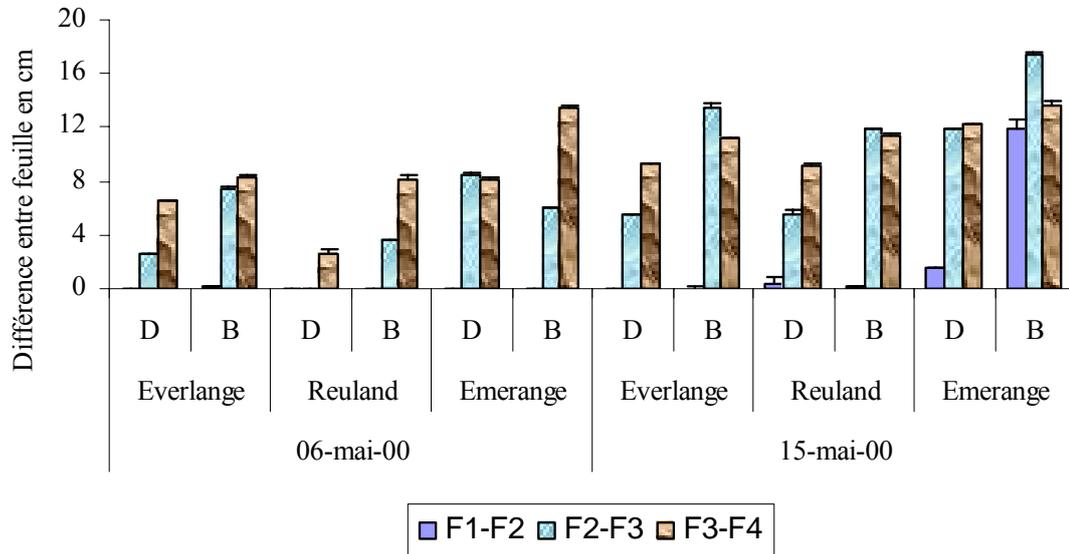


Figure 1-3- 6: Variation de la distance entre les feuilles en 2000 dans les trois sites d'essai à deux dates pour deux variétés Bussard (B) et Dream (D).

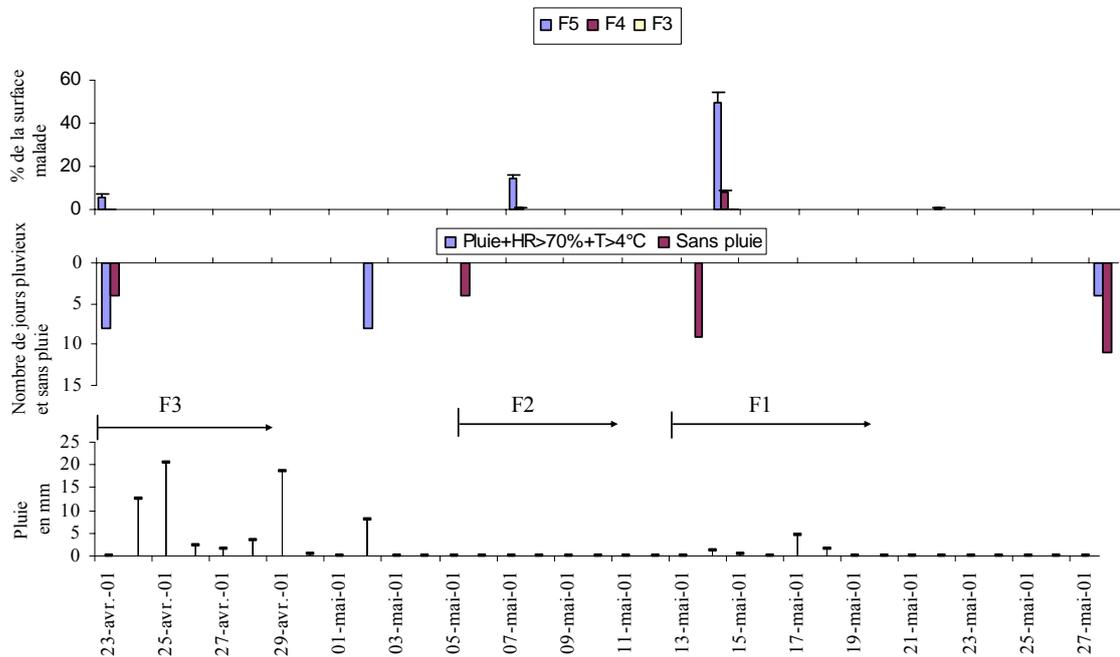
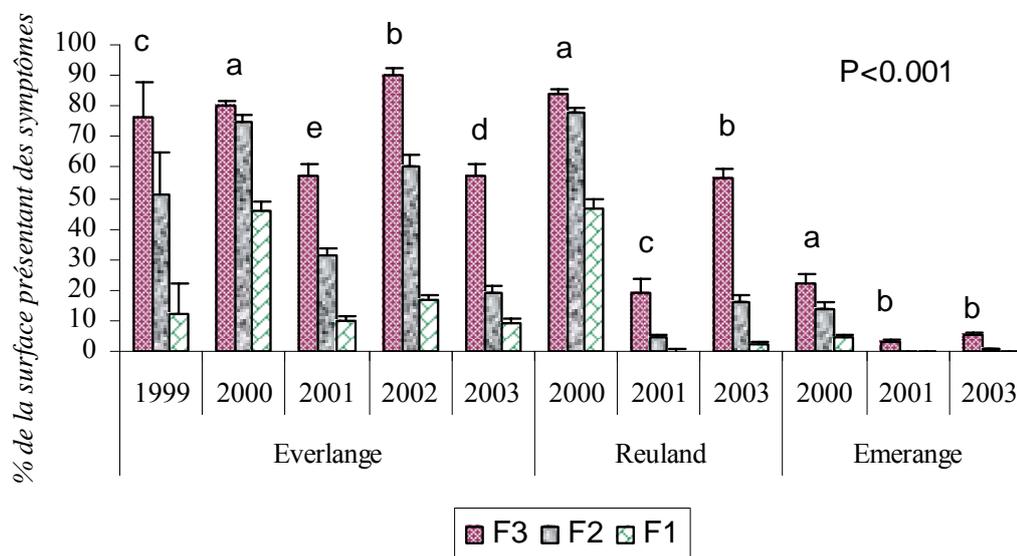


Figure 1-3- 7 : Relation entre les jours pluvieux, le taux de symptômes enregistré sur les trois feuilles de base (F5, F4 et F3) de Bussard (variété sensible) et le moment de formation des trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) dans la Moselle en 2001. Les flèches représentent le moment de formation de chacune des trois dernières feuilles.

### III.1.4. Synthèse

Une étude de synthèse a été développée sur l'ensemble des sites d'essais comprenant toutes les campagnes d'observations réalisées (figure 1-3-8). Cette étude comparative a été réalisée en utilisant le test de Tukey en fonction du taux de maladie enregistré sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) de Bussard à la fin de la maturité laiteuse.



**Figure 1-3- 8 : Comparaison des années par le test de Tukey en fonction du taux de maladie enregistrée sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) à la fin de la maturité laiteuse dans les trois sites d'essai. La différence de lettre représente une différence significative au seuil de 5 %.**

Ainsi, à Everlange, le test de Tukey révèle que 2000 est l'année qui a connu un développement très important de la septoriose par rapport aux quatre autres années d'essais.

L'année 2002 se classe selon le test de Tukey au 2<sup>ème</sup> rang suivi de 1999. Le taux le plus faible de la maladie a été enregistré en 2001 et 2003.

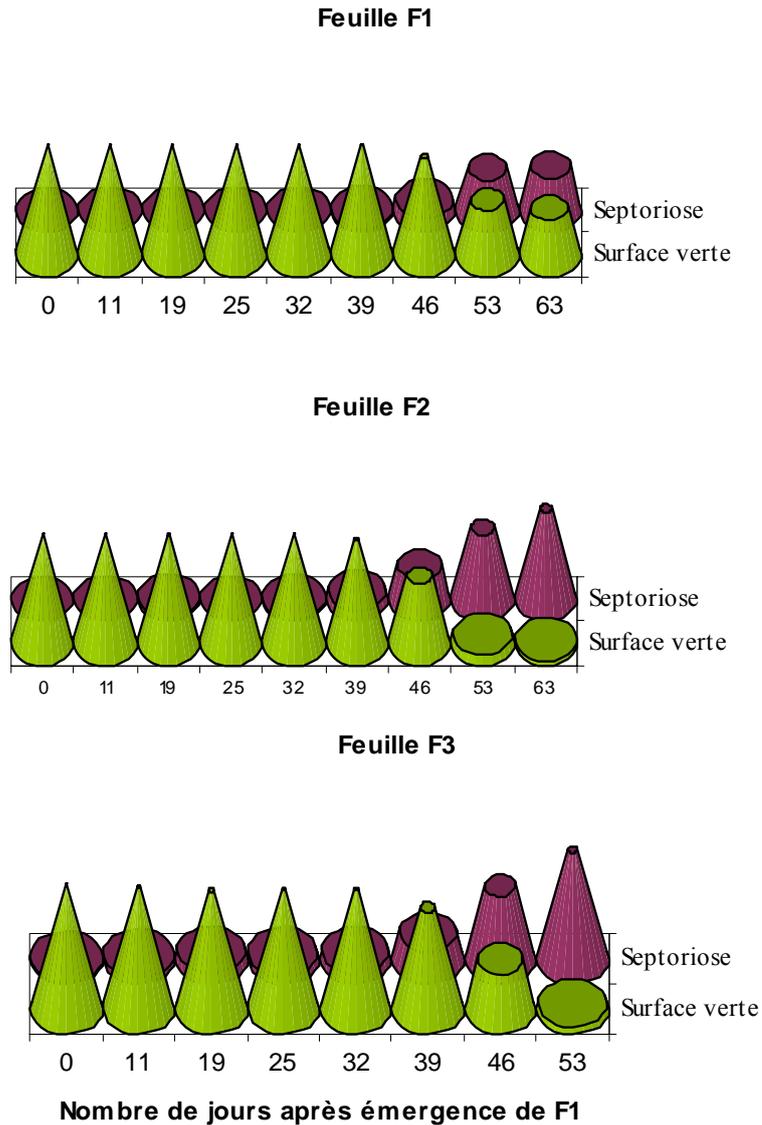
A Reuland, 2000 est l'année qui a connu la plus forte évolution de la septoriose par rapport à 2003 et 2001.

Emerange a été le site qui a connu le plus faible taux de la septoriose par rapport aux deux autres sites d'essais.

Donc, il ressort de cette étude qu'il existe une grande interaction ( $P < 0.001$ ) entre la variété semée et l'emplacement du site. En effet, en plus des variétés, la variation des conditions météorologiques d'un site à l'autre joue un rôle très important dans la variation de la maladie. Ceci révèle l'importance de l'échelle parcellaire pour caractériser cette interaction.

Cependant, cette étude sur la variation de la septoriose dans l'ensemble des sites d'essais ne permet pas à elle seule de quantifier l'ensemble des fonctions de la feuille perturbée par la septoriose. Pour montrer l'effet de symptômes nécrotiques sur la dégradation de la surface verte, nous avons étudié la relation existant entre les symptômes engendrés par la septoriose et la dégradation de la surface verte. Notre étude a révélé une relation directe entre la septoriose et la réduction de la surface verte (figure 1-3-9). L'effet majoritaire de la septoriose sur la photosynthèse nette est lié à la réduction de surface verte par les symptômes. L'accélération de la sénescence des feuilles malades participe également largement à la baisse de la photosynthèse nette par

la réduction de surface verte qu'elle entraîne (figure 1-3-10A). Cependant, l'importance de cet effet dépend d'une interaction forte entre la sévérité de la septoriose et l'âge de la feuille malade. Ainsi, l'étude de l'évolution de la dégradation de la surface verte de la dernière feuille F1 (entre la fin de l'émergence de cette feuille jusqu'à la dégradation totale de la surface verte dans les quatre sites d'essais) montre que la durée de la surface verte en 2003 (figure 1-3-10B) a été plus importante à Burmerange (951 degrés jours) et à Christnach (930 degrés jours). En effet, l'évolution de la septoriose n'a pas été très importante dans ces deux derniers sites. La durée la plus faible de la surface verte a été enregistrée à Everlange (670 degrés jours) et à Reuler (764 degrés jours).



**Figure 1-3- 9 : Variation simultanée de la surface verte et de la septoriose des trois dernières feuilles de Bussard en 2001 à Everlange en fonction du nombre de jours après l'émergence de F1.**

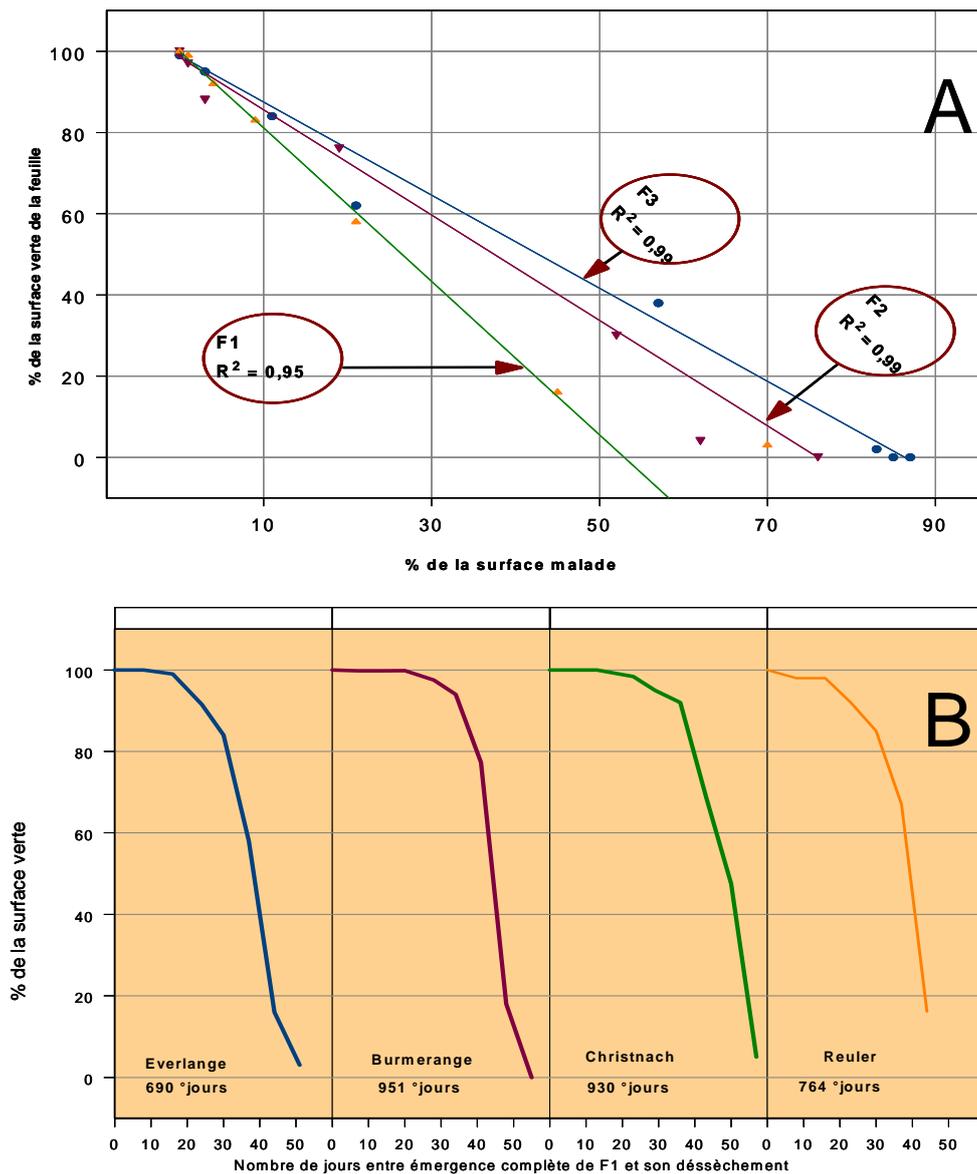


Figure 1-3- 10 : Variation de la surface verte en 2003 : A- Résultats de l'ajustement de l'évolution de la septoriose et la chute de la surface verte à Everlange. B- Evolution de la surface verte entre la fin de l'émergence de la dernière feuille F1 jusqu'à la dégradation totale d'Achat (Everlange), de Bussard (Reuler), de Dekan (Burmerange) et de Flair (Christnach).

## III.2. Relation traitement rendement

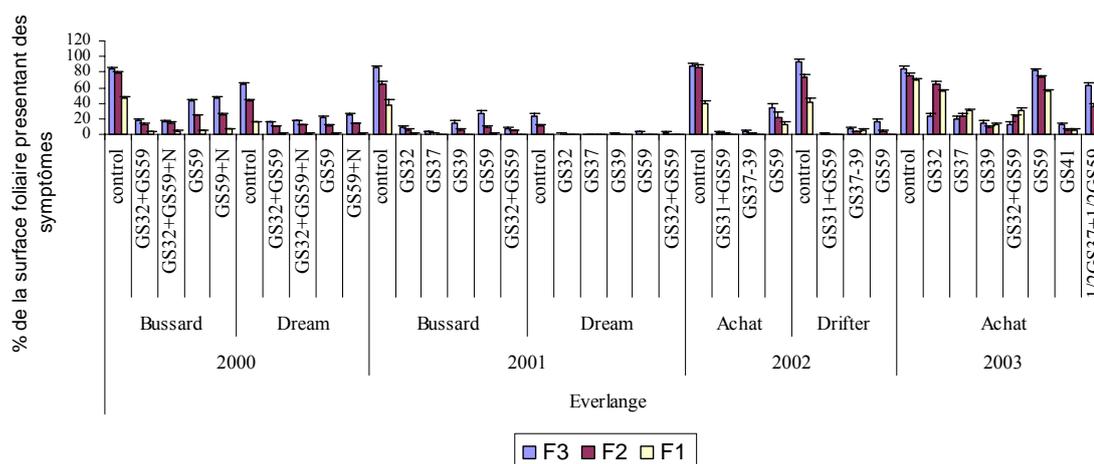
### III.2.1. Everlange

A. Effet du traitement sur la sévérité d'attaque des feuilles.

A Everlange, en 2000, la différence entre les parcelles témoins et celles ayant reçu un traitement (figure 1-3-11) est hautement significative pour les variétés sensibles (Bussard) et les variétés résistantes (Dream). En ce qui concerne la comparaison entre traitements, on ne distingue une différence significative entre variantes que pour les feuilles F2 et F3 de Bussard ( $P < 0.0001$ ) dans l'essai à deux variantes. Pour Dream, cette différence est non significative pour les trois dernières feuilles (tableau 1-3-1).

En 2001, la septoriose ne s'est pas développé de manière aussi importante qu'en 2000 sur Dream. Pour une variété sensible telle que Bussard, la différence entre les parcelles

témoins et celles traitées est hautement significative ( $P < 0.0001$ ) pour les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1). Entre les parcelles avec deux traitements et celles avec un seul traitement, la différence est non significative seulement pour la F1, et significative pour la F2 et la F3. Concernant la F2, c'est le traitement réalisé au stade GS37 qui a assuré la meilleure protection de cette feuille. Pour la F3, la meilleure protection a été réalisée par les variantes GS32+GS59, GS32 et GS37 (tableau 1-3-1). Pour Dream, la différence est significative entre les parcelles témoins et celles traitées mais le taux de la maladie enregistré sur les trois dernières feuilles témoins n'était pas très important (ressemble au traitement GS59 de Bussard).



**Figure 1-3- 11 : Variation de la septoriose en fonction des différentes variantes testées sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) des variétés Bussard et Dream à Everlange pendant les années 2000 à 2003. Ces proportions représentent le niveau de la maladie enregistré entre la fin de la maturité laiteuse et le début de la maturité pâteuse (GS77).**

En 2002, la différence entre les parcelles témoins et celles traitées est hautement significative ( $P < 0.001$ ) pour Achat et Drifter. Cependant, entre les parcelles traitées, le traitement réalisé au stade GS37-39 semble avoir une efficacité semblable à celle de deux traitements pour la variété Achat. Le traitement réalisé au stade GS59 a eu un effet par rapport au témoin mais avec une efficacité significativement moins importante que les traitements GS39 et GS31+GS59 (tableau 1-3-1). Concernant Drifter, l'efficacité des traitements GS37-GS39 et GS31+GS59 par rapport au traitement GS59 se distingue seulement sur la F3. Pour les deux autres feuilles (F2 et F1), l'efficacité était équivalente pour tous les traitements qui ont été réalisés.

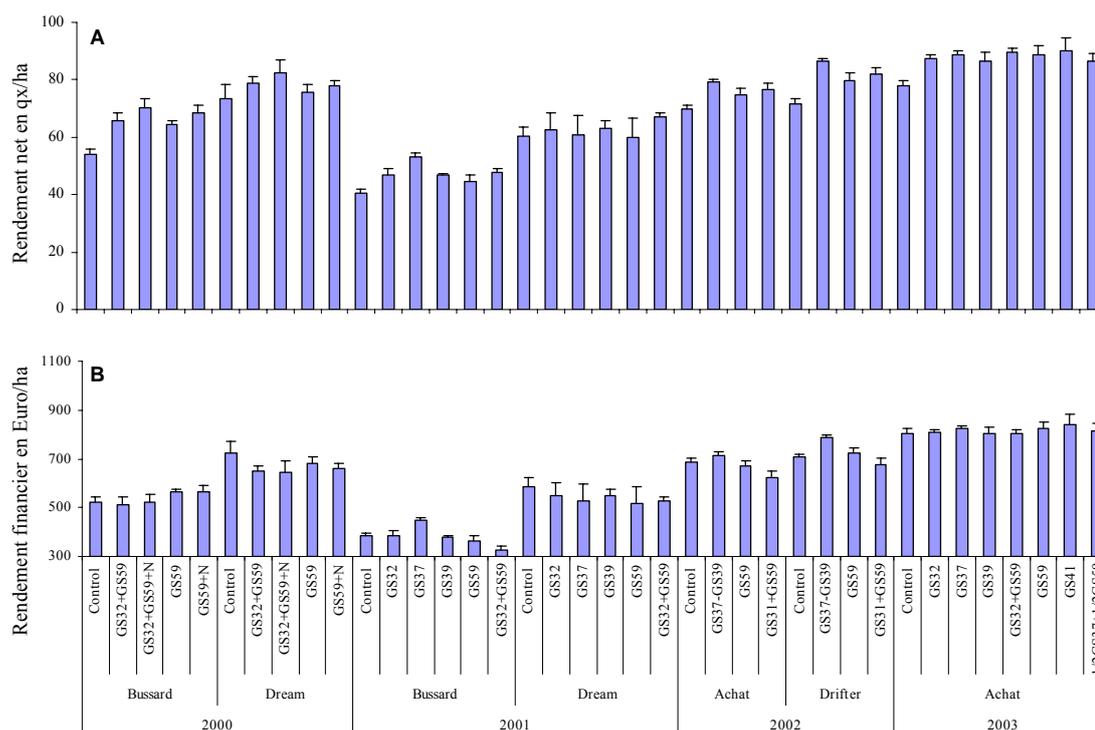
En 2003, le traitement GS59, n'a eu aucune efficacité significative par rapport au témoin pour les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1). Le traitement réalisé au stade GS31-GS32 a permis une protection efficace de la feuille F3. Par contre, cette protection a été très négligeable pour F2 voir absente pour la F1. La meilleure efficacité du traitement pour les trois dernières feuilles a été pendant la période GS41.

**Tableau 1-3- 1 : Test de comparaison de Duncan entre les différentes variantes testées de 2000 à 2002 pour chacune des trois dernières feuilles (F3, F2 et F1). Les différentes lettres représente une différence significative au seuil  $\alpha = 0.05$ .**

	2000						2001						2002						
	Bussard			Dream			Bussard			Dream			Achat		Drifter				
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	
Control	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
GS59	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
GS32							B	C	C	B	B	B							
GS39													C	C	C				
GS41							B	C	D	B	B	B							
GS31+GS59	B	C	C	B	B	B	B	C	D	B	B	B	C	C	C	B	B	C	
GS37							B	D	D	B	B	B				B	B	C	

## B. Etude du rendement

En 2000, la différence du rendement net pour Bussard est très hautement significative ( $Pr > F = 0.0026$ ,  $P < 0.01$ ) entre les parcelles témoins et celles traitées. Cependant, la différence entre les traitements n'est pas significative (figure 1-3-12 A). Le rendement financier ne justifie pas le recours à 2 traitements pour Bussard. Les 2 traitements n'ont pas garanti la couverture des frais de la production. La rentabilité de Bussard ne se justifie financièrement que par le recours à un seul traitement (figure 1-3-12).



**Figure 1-3- 12 : Variation du rendement net en qx/ha (A) et du rendement financier en Euro/ha (B) à Everlange pendant les années 2000 à 2003 en fonction des différentes variantes testées pour deux variétés Bussard et Dream. Le rendement financier est calculé en se basant sur les données suivantes : a) prix du blé à la vente est de 10.4 €/qx; .b) le prix de fongicide à l'hectare avec passage oscille entre 65 € et 67.5 € ; c) le prix du régulateur à l'hectare avec passage est 32.5 € ; d) pour les parcelles qui ont reçue en plus 40 N, le prix à l'hectare avec passage est de 40 €.**

Concernant Dream (variété résistante), la différence entre les parcelles témoins et celles traitées est à la limite de significativité. Le rendement financier ne diffère pas significativement par rapport au témoin. En effet, Dream a été une variété très résistante

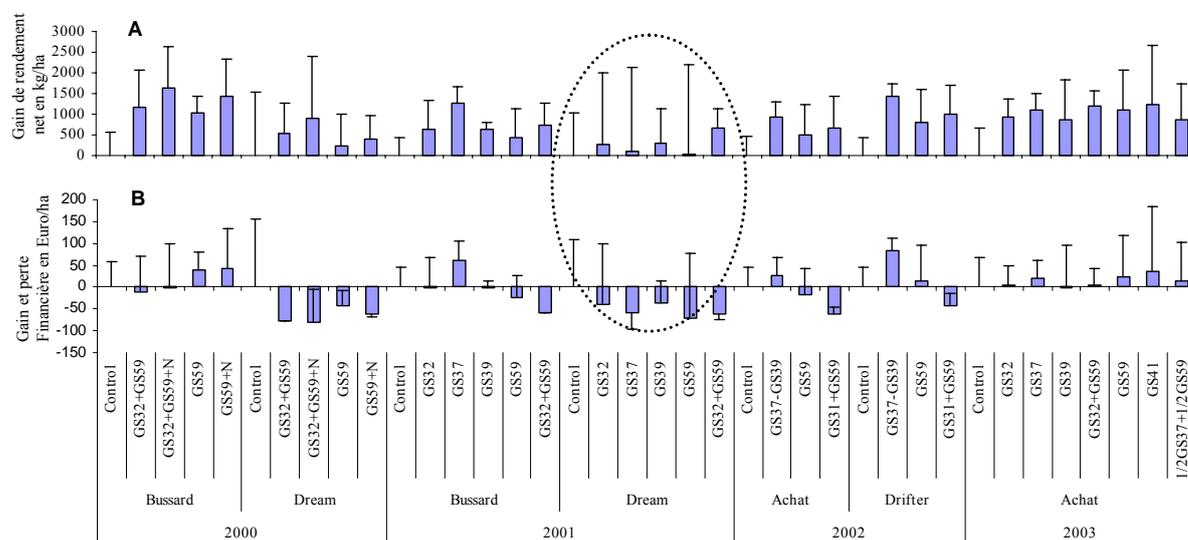
et la moins affectée par la septoriose par rapport à Bussard. Ces résultats semblent confirmer notre analyse sur l'effet du traitement où l'importance du choix variétal a été mentionnée.

En 2001, pour Bussard, la différence est significative entre les parcelles témoins et celles avec traitement. Entre les différents traitements, la différence a été significative ( $P < 0.05$ ) entre le traitement réalisé au stade GS37 et les autres traitements. Ces derniers ne sont pas différents entre eux. Ils diffèrent par rapport au témoin si la différence est fixée à 6 qx/ha. L'analyse du rendement financier (figure 1-3-13) montre que le traitement réalisé au stade GS37 est avantageux par rapport aux autres traitements.

Pour Dream, aucune différence significative du rendement net n'a été enregistrée entre les différents traitements testés par rapport au témoin. L'analyse du rendement financier indique qu'aucun traitement testé n'a pu compenser les dépenses de l'achat des intrants.

En 2002, pour Achat la meilleure rentabilité économique a été assurée par le traitement réalisé entre le stade GS37 et GS39. Les traitements GS59 et GS31+GS59 n'ont même pas permis de compenser les dépenses de l'achat des intrants.

Pour la variété Drifter où le traitement réalisé entre les stades GS37 et GS39 a permis d'assurer une meilleure rentabilité financière. Les traitement GS59 et GS31+GS59 ont aussi une différence significative par rapport au témoin ( $P < 0.05$ ). Cependant, l'analyse du rendement financier a montré que le traitement réalisé entre les stades GS37 et GS39 a assuré un gain de plus de 80 Euro/ha par rapport au traitement épiaison (moins de 20 Euro/ha). En outre, les 2 traitements n'ont même pas permis de compenser les dépenses de l'achat des intrants.

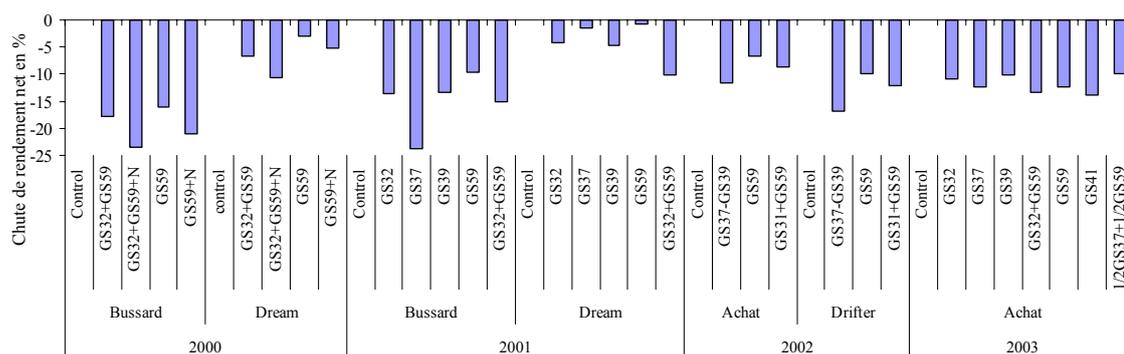


**Figure 1-3- 13 : Gain du rendement net à Everlange entre 2000 et 2003 des parcelles traitées par rapport aux témoins en kg/ha (A) et le gain et la perte financière en Euro/ha par rapport aux témoins (B). Les barres verticales représentent la variation d'Ecart-type. Le cercle représente la variation au sein de Dream en 2001.**

En 2003, le meilleur rendement net et financier (en €) a été assuré par le traitement réalisé au stade GS41 (figure 1-3-13). Ce traitement dépasse les autres traitements surtout GS32+GS59. Les traitements qui ont été réalisés au stade GS59, GS37 et les deux demi doses apportées au stade GS37 (Sphère 0.5 l/ha) et GS59 (Horizon 0.5 l/ha) ont abouti aussi à un gain de rendement.

Pour le traitement réalisé au stade GS39, il a été appliqué 4h juste avant une forte pluie. Par conséquent cette pluie aurait affecté l'efficacité du produit (en comparaison par rapport au traitement GS37 et GS41).

Pour quantifier l'importance économique de chaque traitement pendant les 4 années d'essais, nous avons calculé en % le gain du rendement net de chaque traitement par rapport au témoin (figure 1-3-14). Ces résultats montrent que pour les variétés sensibles, le traitement permet de réaliser un gain net de plus de 25 % par ha par rapport au témoin. Cependant, pour les variétés résistantes, ce gain ne dépasse pas 10 % dans les meilleurs des cas. En plus, lorsque l'année est faible en septoriose comme c'était le cas en 2001, le gain assuré par le traitement d'une variété résistante est très négligeable.



**Figure 1-3- 14: Pourcentage des gains de rendement net des différents traitements par rapport au témoin à Everlange entre 2000 et 2003.**

Cette étude montre aussi qu'un seul traitement appliqué à un stade bien précis assure un meilleur gain non seulement par rapport au témoin mais aussi par rapport aux autres traitements.

Donc, l'application d'un traitement fongicide est conditionnée par trois éléments importants et indispensables :

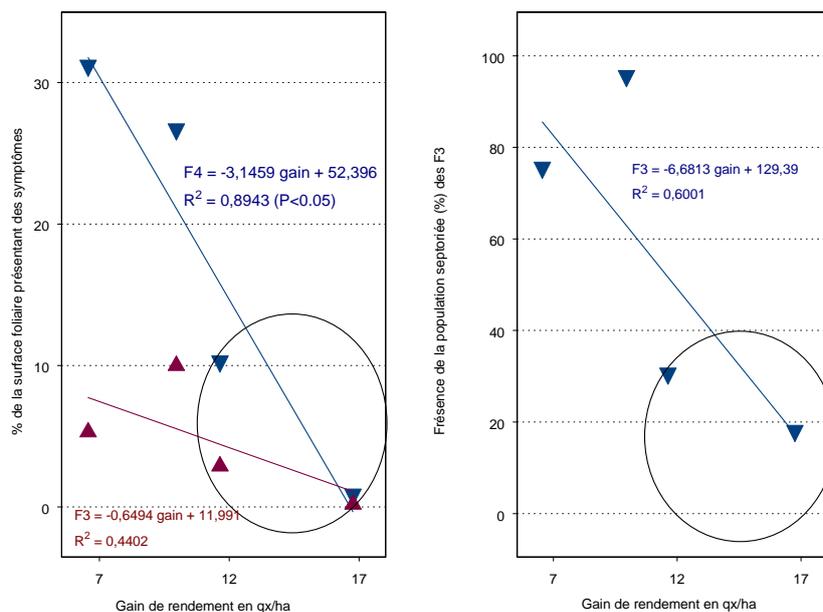
- L'importance de l'inoculum primaire et la variation des conditions météorologiques pendant la montaison ;
- Le choix des variétés : cette étude met en évidence une grande différence de comportement entre Bussard (sensible) et Dream (résistante) ;
- Le stade de traitement en fonction de l'évolution de la maladie sur la F4 et la F3. Il s'agit de déterminer un seuil de référence par rapport au niveau de maladie enregistré sur la F4 et/ou la F3. ZADOKS (1985) a défini trois seuils importants qui consistent à relier la sévérité de la maladie à un stade donné particulier (celui qui donne la meilleure relation) et les pertes de rendement : a) le seuil de dommage qui correspond à la plus faible quantité de pathogène qui cause un dégât; b) le seuil d'action qui est la quantité de maladie à partir de laquelle l'agriculteur doit agir pour éviter que la population de pathogènes atteigne le seuil de dommage et enfin c) le seuil d'avertissement qui est le seuil auquel l'agriculteur doit se préparer à traiter. Seulement, faut-il prendre comme référence le niveau de maladie ou la fréquence de feuilles malades ?

Pour répondre à cette question, nous avons comparé la relation existant entre le niveau de maladie enregistré sur la F4 et la F3, au moment de l'application des traitements GS37-GS39 et GS59 pour deux variétés Drifter et Achat, et le gain de rendement

(figure 1-3-15) ainsi que la relation qui relie la fréquence des populations F2 et F3 (pendant l'application des traitements GS37-GS39 et GS59) et le gain de rendement.

En se basant uniquement sur le taux de la maladie, le meilleur seuil de traitement est enregistré lorsque le taux de la maladie ne dépasse pas 5% pour la F3 et 10 % pour la F4. Mais le taux de la maladie enregistré sur la F4 ( $r^2 = 0.89$ ,  $P < 0.05$ ) semble être un meilleur indicateur que celui de F3. Cependant, la corrélation est plus importante en se basant sur la fréquence des F3 malades que sur le taux de la maladie.

Enfin, d'autres recherches complémentaires devraient être réalisées dans l'avenir pour approfondir cette question de seuil d'avertissement pour la septoriose en prenant en compte les variétés. Ces seuils devraient être défini aussi pour les autres maladies cryptogamiques telles que la rouille brune et l'oïdium.

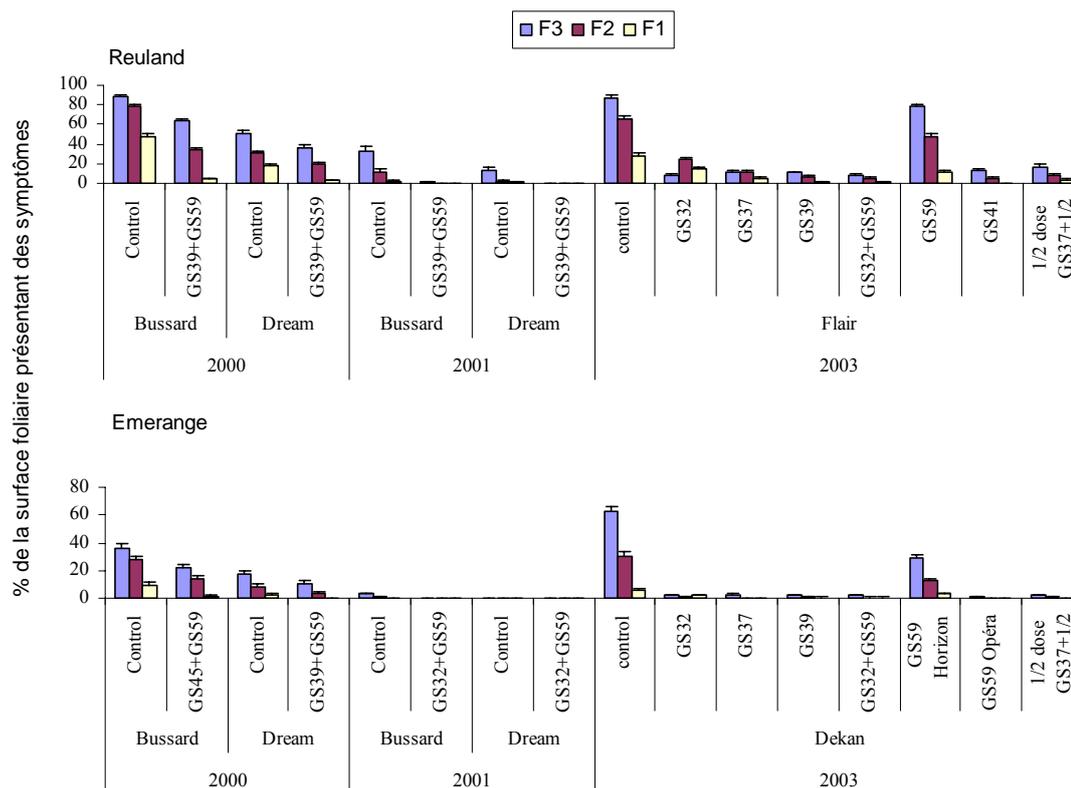


**Figure 1-3- 15 : Variation du gain de rendement en qx/ha en fonction du taux de symptômes enregistrés sur la F3 et la F4 et la fréquence de la population des F3 malades au moment de l'application des traitements GS37-GS39 et GS59. Les cercles représentent le meilleur seuil de préférence.**

### III.2.2. Reuland et Moselle

L'efficacité du traitement par rapport au témoin en 2000 se distingue nettement plus à Reuland que dans la Moselle (figure 1-3-16). En effet, dans la Moselle, la différence entre parcelles témoins et celles avec deux traitements a été significative mais le taux de maladie enregistré dans ce site a été très faible par rapport à Reuland. Le comportement variétal a également agité énormément sur la différence de sévérité de la maladie d'une variété à l'autre. Notre analyse ANOVA révèle un effet hautement significatif des variétés ( $P < 0.001$ ). Le comportement résistant de Dream vis-à-vis de la septoriose se distingue nettement dans les deux sites.

Dans la Moselle, les faibles périodes pluvieuses du mois de mai et de juin 2000 n'ont pas permis de creuser l'écart entre le traitement et le témoin. Par contre, à Reuland, les deux traitements ont assuré la protection des 2 derniers étages foliaires de nombreuses périodes pluvieuses de fin mai pour les variétés sensibles. Pour les variétés résistantes, la différence entre le traitement et le témoin est quasi nulle. L'étude de rendement économique (figure 1-3-17) confirme les arguments énoncés ci-dessus.



**Figure 1-3- 16 : Variation de la septoriose en fonction des différentes variantes testées sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) des variétés Bussard et Dream à Reuland et dans la Moselle (Emerange) pendant les années 2000, 2001 et 2003. Ces proportions représentent le niveau de la maladie enregistré entre la fin de la maturité laiteuse et le début de la maturité pâteuse.**

En 2001, le double traitement fongicide (GS32+GS59) dans la Moselle n'a apporté aucune protection significative par rapport au témoin même pour les variétés sensibles. Ceci s'explique par la rareté de périodes pluvieuses qui ont été enregistrées dans ce site et donc l'absence de maladie. Par contre, à Reuland, l'effet du traitement a été très hautement significatif ( $P < 0.001$ ) mais diffère énormément entre variétés ( $P < 0.001$ ). En effet, l'efficacité de 2 traitements ne se justifie que pour Bussard. Pour Dream, aucune différence n'a été enregistrée entre le témoin et le double traitement (GS32+GS59). L'analyse de l'efficacité de traitement par la procédure de Tukey qui utilise le test de Student (HSD) montre que les 2 traitements n'ont eu aucun effet sur la F1 de Bussard, la F1 et la F2 de Dream. Concernant la F2 de Bussard, un écart de 11 % a été enregistré entre le témoin et traitements. Pour la F3, un écart de 31 % entre les parcelles témoins et celles traitées a été enregistré pour Bussard et 7 % pour Dream.

L'analyse du rendement net (figure 1-3-17) n'indique aucune différence significative (même pour les variétés sensibles) entre les 2 traitements et le témoin à Reuland et à Emerange.

En 2003, la différence est hautement significative ( $P < 0.05$ ) entre les différentes variantes et le témoin à l'exception du traitement réalisé au stade GS59 (Opéra 1,5 l/ha) à Christnach (Reuland) et celui réalisé avec Horizon 1l/ha à Emerange. Cependant, le taux de la maladie enregistré sur la F2 et la F1 était très faible même sur les parcelles témoins à Emerange.

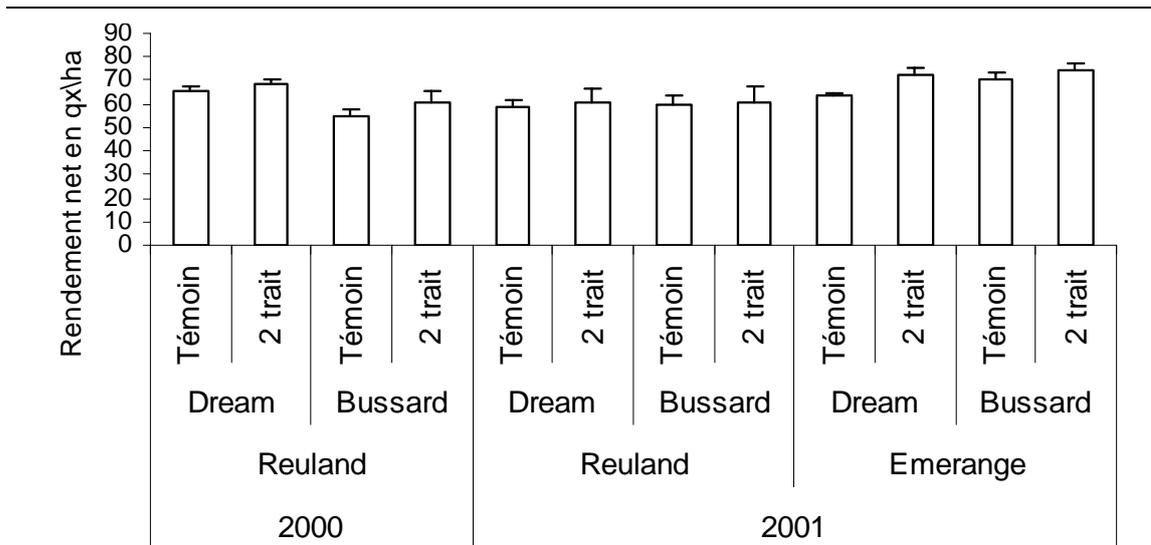


Figure 1-3- 17 : Variation du rendement net en qx/ha à Reuland pendant les années 2000 à 2001 et à Emerange en 2001 pour deux variétés Bussard et Dream.

L'analyse du gain de rendement net (kg/ha) et du rendement financier (Euro/ha) à Christnach (figure 1-3-18), ne révèle aucune différence significative entre les différents traitements et le témoin. Aucun traitement n'a pu compenser les dépenses des intrants. Les parcelles témoins ont assuré une meilleure rentabilité financière par rapport aux différents traitements.

Pour le site de Burmerange, c'est le traitement GS39 qui a assuré la meilleure rentabilité économique et financière. Cette efficacité du traitement GS39 par rapport aux autres variantes ne s'explique pas par la variation de la septoriose mais par sa meilleure protection contre la rouille brune.

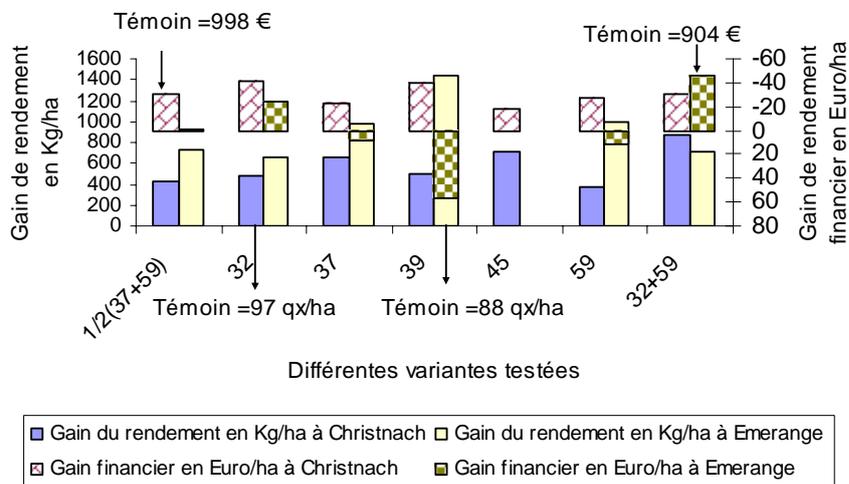
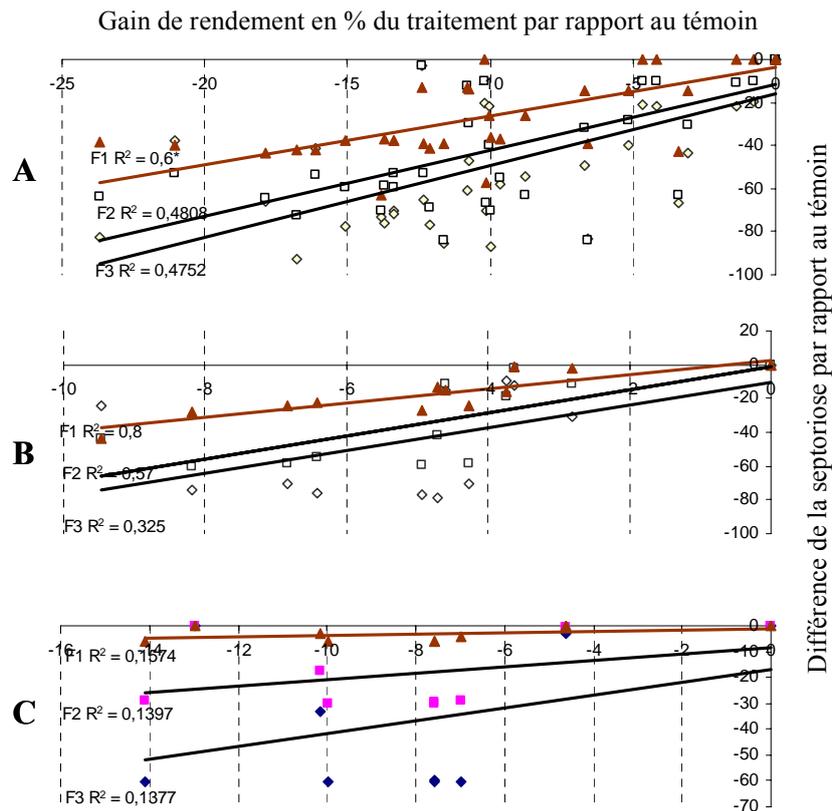


Figure 1-3- 18 : Gain du rendement net en Kg/ha à Christnach et Emerange en 2003 des parcelles traitées par rapport aux témoins et le gain et la perte financière en Euro/ha par rapport aux témoins .

### III.3. Relation septoriose-gain de rendement

L'étude de la corrélation entre l'état sanitaire de chacune des 3 dernières feuilles (F3, F2 et F1) pendant la maturité avec le gain de rendement net (figure 1-3-19) suite aux traitement réalisé entre 2000 à 2003 révèle une grande importance de F1 par rapport aux deux autres feuilles.



**Figure 1-3- 19 : Relation entre l'amélioration des trois dernières feuilles et les gains en rendement entre 2000 et 2003. A : Everlange ; B : Christnach ; C : Emerange.**

En effet, à Christnach et Everlange, l'état sanitaire de F1 a beaucoup influencé la définition du rendement finale. Les feuilles F2 et F3 ont moins influencé le rendement final par rapport à F1 mais agissent indirectement sur l'état sanitaire de ce dernier étage.

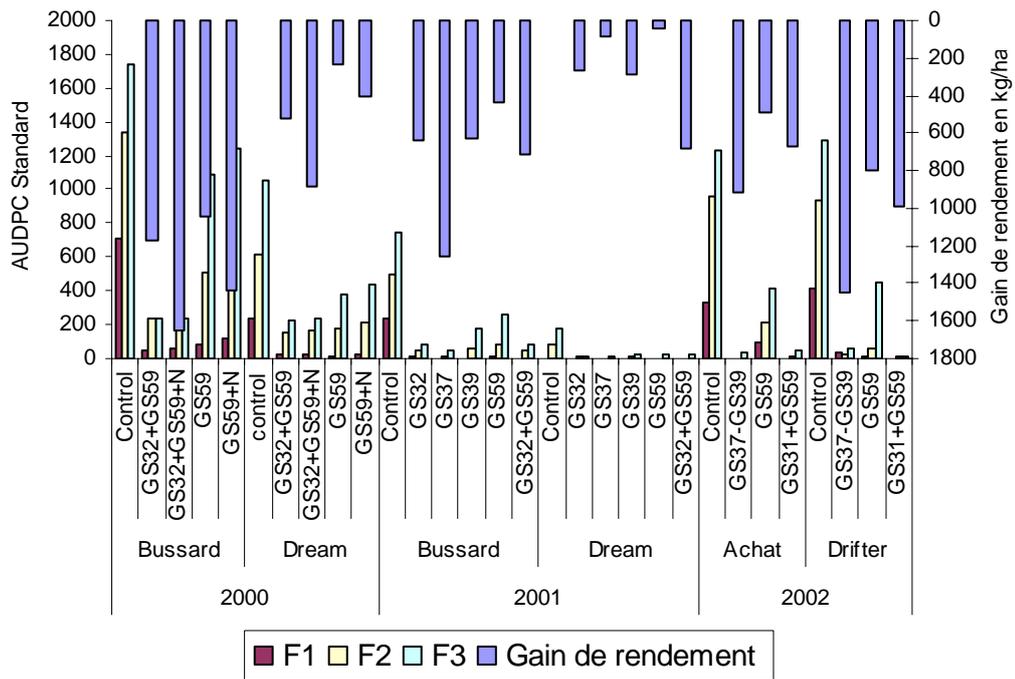
A Emerange, la corrélation entre l'état sanitaire des trois dernières feuilles et la perte de rendement a été beaucoup moins importante par rapport aux deux autres sites. Ceci s'explique par le faible taux de maladie enregistré dans ce site pendant les années 2000 à 2003.

Pour déterminer la période la plus propice à la définition du rendement, nous avons calculé l'AUDPC des trois dernières feuilles entre la fin de la floraison et la pleine maturité pour chaque variante qui a été testée pendant les années 2000 à 2002 à Everlange (figure 1-3-20). Cette analyse a montré une corrélation négative très importante et significative entre l'AUDPC et le gain de rendement pour les variétés susceptibles (Bussard, Achat) et pour les années à fortes potentialités de maladies (2000 et 2002). Donc, la définition du rendement dépend essentiellement de l'état des trois dernières feuilles entre la fin de la floraison et la maturité.

En 2003, nos résultats (figure 1-3-21) confirment ceux des autres années d'étude et montre que le rendement final se définit à partir de la fin de floraison. Entre deux périodes (à partir de la floraison), c'est la variation de l'AUDPC de la septoriose et de la surface verte qui affecte le rendement. Cependant, la période de floraison n'a pas trop d'effet sur le rendement final. De plus, le rendement est affecté par l'état de la surface verte pendant la période s'étalant entre la fin de floraison et fin de la maturité laiteuse et non pas par celle de la maturité finale. En effet, la formation et le grossissement des grains se font pendant la maturité laiteuse. Une réduction de la surface verte entraînera une réduction de la photosynthèse. Pendant la phase de la maturité laiteuse, nous

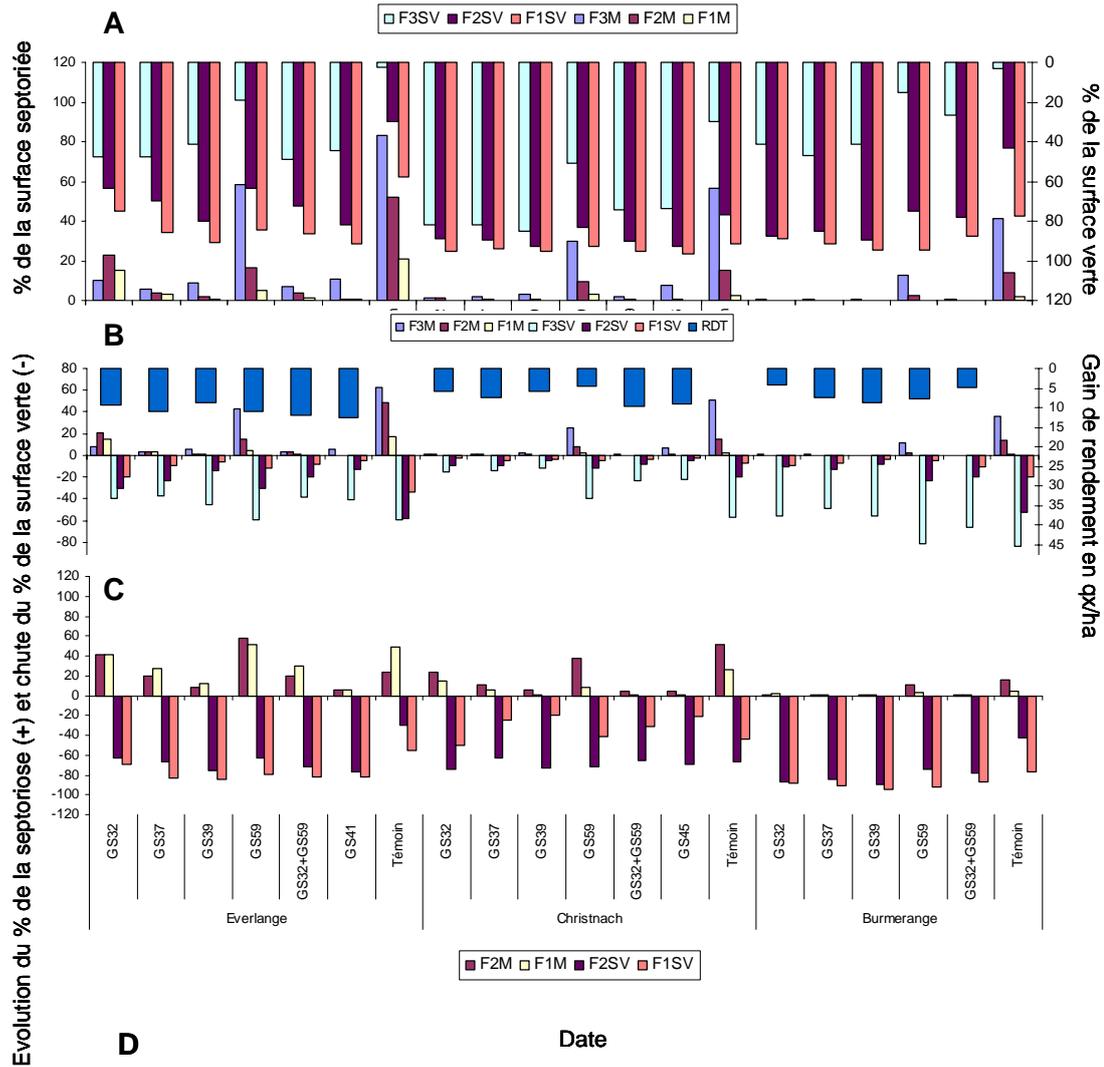
remarquons (figure 1-3-21 D) une relation entre d'une part, le taux de la septoriose et le gain de rendement et d'autre part entre la surface verte et le gain de rendement.

Ces perturbations liées au parasite, affectent l'interception lumineuse et le processus de photosynthèse (MADEIRA *et al.*, 1994). Donc, l'état sanitaire de la feuille pendant la période de la maturité laiteuse a une relation directe avec le gain de rendement. Dans cette étude, notre analyse s'est basée uniquement sur la surface verte exprimée en %. Nous estimons que la surface verte exprimée par unité de surface mesurée en m<sup>2</sup> pourrait apporter une grande contribution lorsqu'il s'agit de comparer un ensemble de variétés. Les dimensions des surfaces foliaires sont différentes entre variétés.



	2000			2001			2002		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Achat							-0,96	-0,95	-0,96
Bussard	-0,92	-0,92	-0,73	-0,75	-0,80	-0,86			
Dream	-0,65	-0,72	-0,80	-0,44	-0,45	-0,42			
Drifter							-0,87	-0,9	-0,9

Figure 1-3- 20 : Variation de l'AUDPC des trois dernières feuilles (F3, F2, F1) et le gain de rendement en kg/ha à Everlange entre 2000 et 2002.



		Date									
		GS69		GS77-GS69		GS77		GS87-GS77		GS87	
		S	SV	S	SV	S	SV	S	SV	S	SV
Everlange	F3	-0.3	0.5*	-0.5*	0.4	-0.5*	0.4	-	-	-	-
	F2	-0.4	-0.02	-0.6*	0.4	-0.6*	0.5*	-0.52*	0.5*	-0.4	-0.1
	F1	-0.1	-0.04	-0.6*	0.4	-0.7*	0.5*	-0.5*	0.4	-0.5*	-0.05
		GS65		GS75-GS65		GS75		GS85-GS75		GS85	
Christnach	F3	-0.42	0.32	-0.5*	0.5*	-0.6*	0.6*	-	-	-	-
	F2	-0.1	0.4	-0.4	0.5*	-0.5*	0.5*	-0.6*	0.5*	-0.5*	0.4
	F1	-0.01	0.2	-0.2	0.4	-0.4	0.4	-0.5*	0.4	-0.6*	0.3
		GS77		GS87-GS77		GS87		GS91-GS87		GS91	
Burmerange	F3	-0.2	0.6*	-0.3	0.2	-0.6*	0.3	-	-	-	-
	F2	-0.6	0.5*	-0.3	0.3	-0.5*	0.6*	-0.3	0.4	-	-
	F1	-0.52	-0.2	-0.2	0.2	-0.6*	0.3	-0.4	0.2	-	-

Figure 1-3- 21 : Relation gain de rendement maladie en 2003. A/ % de Surface verte (SV) et maladie (M) sur les trois dernières feuilles au stade GS77 (23 juin). B/ Evolution de la septoriose (%) et réduction de la surface verte (%) enregistrée entre fin floraison (GS69) et maturité laiteuse en relation avec le gain de rendement. C/ Evolution de la septoriose (%) et réduction de la surface verte (%) enregistrée entre fin de maturité laiteuse et maturité pâteuse. D/ corrélation (\* : significatif au seuil de 5%) entre septoriose, surface verte avec le gain de rendement dans les trois sites d'essais.

### III.4. Effet variétal

La prise de décision sur la nécessité de recours au traitement fongicide ne pourrait se faire en se basant uniquement sur la variation des conditions météorologiques favorable à tel ou tel champignon. Les contrastes entre variétés sont très importants pour un même parasite. Le comportement variétal constitue le leitmotiv indispensable à toute prise de décision sur le moment optimum de traitement. La différence du comportement entre une variété susceptible (Bussard) et une variété résistante (Dream) a été nettement évoquée lors de notre analyse. Cette différence de comportement entre les deux variétés concerne tous les étages foliaires (ceux de la base comme ceux du sommet de la tige). Cette différence de comportement entre une variété susceptible et une variété résistante paraît normale mais ce qui est important à signaler est le changement du comportement d'une variété entre les étages foliaires situés à la base et ceux du sommet de la tige. En effet, en 2000 et 2001, les F5, F4 et F3 de Bussard et Flair ont été attaquées au même moment et le pourcentage d'attaque est quasi proche durant toutes les observations. Mais pour les deux étages foliaires supérieurs (F2 et F1), bien qu'ils soient attaqués au même moment, la différence entre les 2 variétés est remarquable et significative ( $P < 0.05$ ) au fil du temps (figure 1-3-22).

Cette différence de comportement des 3 dernières feuilles de Flair par rapport à celles de Bussard peut-elle être due à une exigence plus importante en durée d'humectation ?

Parmi les hypothèses plausibles, il est possible que les 3 feuilles situées à la base (F5, F4 et F3) de Flair aient besoin d'un seuil minimal d'humidité plus important pour qu'elles soient infectées. Cependant, les deux feuilles supérieures (F2 et F1) échappent à ce seuil minimal d'humidité et exigent une humidité relative proche de 100 % pendant plusieurs heures. C'est ce qu'on appelle l'effet d'échappement (la plupart des 2 dernières feuilles échappent à des périodes humides minimales nécessaires à l'infection).

Pour vérifier cette hypothèse, une étude a été développée sur les principales variations de l'AUDPC de F1 et F2 de Flair à Everlange en 2000 en calculant le nombre d'heures d'humidité pour différentes classes d'humidité (60-70 %, 70-80 %, 80-90 %, 90-100 %). En plus de l'humidité, notre étude s'est intéressée aussi au volume et la persistance de la pluie et des températures entre 4°C et 20°C. Il ressort de cette étude que la classe d'humidité qui influence les principales variations de l'AUDPC de F1 et F2 entre Bussard et Flair est celle qui varie entre 90 et 100 %. Cependant, cette classe d'humidité doit être associée avec une pluie importante et persistante (figure 1-3-23).

Le mode de répartition de l'eau dépend de la nature de la feuille (fonction de la variété et de l'âge) et dépend également de la nature des précipitations. Une pluie fine et continue ne mouillera que la face supérieure des feuilles et aura tendance à produire un film d'eau continu tandis que la rosée ou une forte averse mouillera les deux faces, la 1<sup>ère</sup> distribuant de fines gouttelettes, la 2<sup>ème</sup> créant un film d'eau (HUBER, 1987).

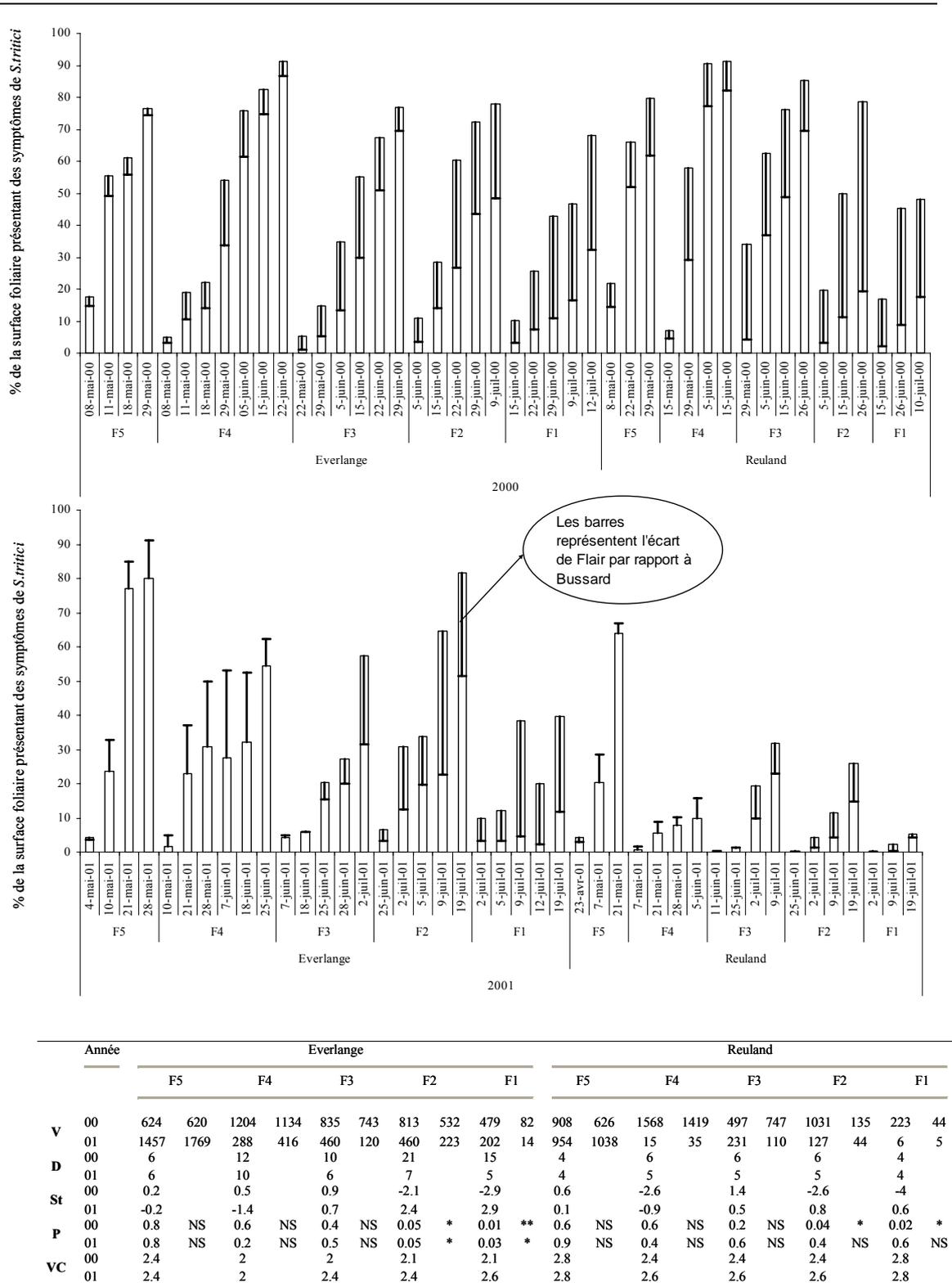


Figure 1-3- 22 : Variation du % de la surface foliaire présentant des symptômes de *Septoria tritici* de Bussard et des écarts (barres verticales) de cette dernière variété par rapport à Flair à Everlange et Reuland en 2000 et 2001. Les résultats du tableau représentent les résultats statistiques (Test d'égalité des espérances: deux observations de variances différentes) avec la variance (V) calculée pour chaque feuille de Bussard (1<sup>ère</sup> colonne) et Flair (2<sup>ème</sup> colonne), degré de liberté (D), Statistique t (St), probabilité P (T <= t) bilatéral (P), Valeur critique de t bilatéral (VC). NS = non significatif (P > 0.05), \*=significative (P < 0.05), \*\*=hautement significative (P < 0.01).

Cette étude a montré l'importance du comportement variétal pour la mise en place d'une agriculture de précision. En effet, la variation du comportement de Flair vis-à-vis de Bussard entre les étages foliaires situés à la base et ceux du sommet indique son importance dans toute prise de décision. Pour une bonne calibration de l'équation de quantification de la maladie, il est important de calculer avec précision le besoin en durée d'humectation des feuilles supérieures des variétés comme Flair.

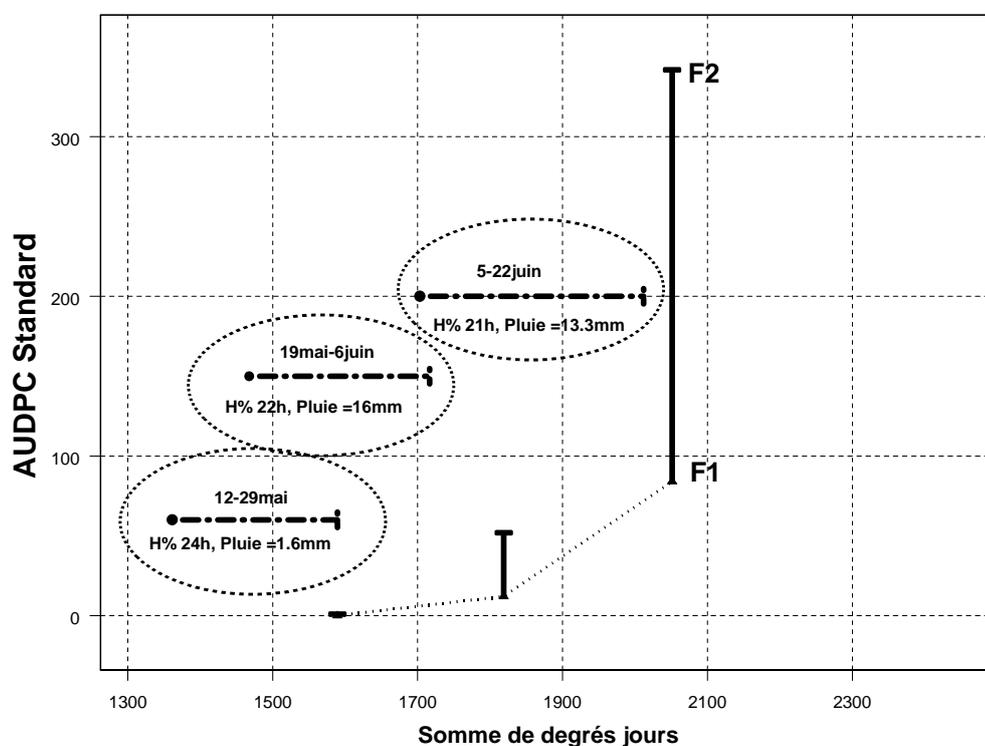


Figure 1-3- 23 : Variation de l'AUDPC de F1 et F2 de Flair en 2000 à Everlange et les principales périodes d'infections. H représente le nombre d'heures d'humidité de la classe comprise entre 90 et 100 %.

#### IV. Conclusion

La septoriose des feuilles causée par *S. tritici* [ROBBINS & DESMAZIERES] (téléomorphe *M. graminicola*) est la principale maladie affectant le blé d'hiver (*Triticum aestivum*) au Grand-duché du Luxembourg (EL JARROUDI *et al.*, 2001 ; EL JARROUDI *et al.*, 2002). Elle peut causer une perte de rendement de 20 à 30 %, selon les conditions météorologiques et les conditions culturales, particulièrement le choix variétal.

La mise en application d'une agriculture de précision repose sur la compréhension des besoins de chaque variété en périodes humides pour les 5 étages foliaires (F5 à F1).

En effet, cette étude a montré l'importance du choix variétal dans toute stratégie de traitement (le meilleur exemple est la variation entre Bussard et Dream). En plus du choix variétal, cette étude a montré que le recours à plusieurs traitements (2 traitements) basés uniquement sur le stade phénologique n'apporte aucune justification financière par rapport à un seul traitement bien ciblé. Pour les années à faible potentiel de septoriose, le recours à 2 traitements ne couvre même pas les prix des intrants d'où la nécessité de mettre en place un système d'avertissement pour cette maladie au Grand-Duché de Luxembourg pour cibler le moment optimum du traitement.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

- 1-3-1 : Test de comparaison de Duncan entre les différentes variantes testées de 2000 à 2002 pour chacune des trois dernières feuilles (F3, F2 et F1). Les différentes lettres représente une différence significative au seuil  $\alpha = 0.05$ .....III-16

## FIGURES

- 1-3-1 : Variation de la septoriose en 1999 à Everlange en fonction de variétés pendant la maturité laiteuse (GS72) : A/ 2 traitements, le 1<sup>er</sup> est Allegro (1 l/ha) appliqué le 12 mai 1999, le 2<sup>ème</sup> est Opus Team (1.5 l/ha) appliqué le 5 juin 1999 avec un raccourcisseur Cycocel (0.5 l/ha) appliquée le 20 avril 1999 ;B/ un seul traitement Allegro (1l/ha) appliqué le 24 mai 1999 avec un raccourcisseur Cycocel (0.5 l/ha) appliqué le 20 avril 1999 ;C/ Témoin sans traitement et sans raccourcisseur, D/ Test variétal sans traitement ni raccourcisseur (des lettres minuscules différentes indiquent une différence variétale significative au seuil  $\alpha = 5\%$ ).....III-4
- 1-3-2 : Evolution de la septoriose à Everlange pendant les années 2000, 2001, 2002 et 2003 sur les feuilles du blé en fonction du stade de croissance selon ZADOCKS *et al.*(1974) et les variétés ainsi que la pluie enregistrée pendant ces années. En 2000 et 2001, B et D représentent respectivement Bussard et Dream. En 2002, A et Dr représentent respectivement Achat et Drifter. Les flèches (noir : Bussard en 2000 et 2001 et Drifter en 2002 ; orange : Dream en 2000 et 2001 et Achat en 2002) représentent le moment de formation des trois dernières feuilles.....III-5
- 1-3-3 : Ecart de l'AUDPC relative de Dream par rapport à Bussard prise comme référence (100%). Exemple à Everlange en 2001.....III-7
- 1-3-4 : Evolution de la septoriose à Reuland pendant les années 2000, 2001 et à Christnach en 2003 sur les feuilles du blé en fonction du stade de croissance selon Zadocks *et al.* 1974 et des variétés. En 2000 et 2001, B et D représentent respectivement Bussard et Dream. Les flèches (noir : Bussard ; orange : Dream) représentent le moment de formation des trois dernières feuilles.....III-8
- 1-3-5 : Evolution de la septoriose dans la Moselle pendant les années 2000, 2001 et en 2003 sur les feuilles du blé en fonction du stade de croissance selon ZADOKS *et al.* (1974) et des variétés. En 2000 et 2001, B et D représentent respectivement Bussard et Dream. Les flèches (noir : Bussard ; orange : Dream) représentent le moment de formation des trois dernières feuilles.....III-10
- 1-3-6: Variation de la distance entre les feuilles en 2000 dans les trois sites d'essai à deux dates pour deux variétés Bussard (B) et Dream (D).....III-11
- 1-3-7 : Relation entre les jours pluvieux, le taux de symptômes enregistré sur les trois feuilles de base (F5, F4 et F3) de Bussard (variété sensible) et le moment de formation des trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) dans la Moselle en 2001. Les flèches représentent le moment de formation de chacune des trois dernières feuilles.....III-11
- 1-3-8 : Comparaison des années par le test de Tukey en fonction du taux de maladie enregistrée sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) à la fin de la maturité laiteuse dans les trois sites d'essai. La différence de lettre représente une différence significative au seuil de 5%.....III-12
- 1-3-9 : Variation simultanée de la surface verte et de la septoriose des trois dernières feuilles de Bussard en 2001 à Everlange en fonction du nombre de jours après l'émergence de F1.....III-13
- 1-3-10 : Variation de la surface verte en 2003 : A- Résultats de l'ajustement de l'évolution de la septoriose et la chute de la surface verte à Everlange. B- Evolution de la surface verte entre la fin de l'émergence de la dernière feuille F1 jusqu'à la dégradation totale d'Achat (Everlange), de Bussard (Reuler), de Dekan (Burmerange) et de Flair (Christnach).....III-14
- 1-3-11 : Variation de la septoriose en fonction des différentes variantes testées sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) des variétés Bussard et Dream à Everlange pendant les années 2000 à 2003. Ces proportions représentent le niveau de la maladie enregistré entre la fin de la maturité laiteuse et le début de la maturité pâteuse (GS77).....III-15
- 1-3-12 : Variation du rendement net en qx/ha (A) et du rendement financier en Euro/ha (B) à Everlange pendant les années 2000 à 2003 en fonction des différentes variantes testées pour deux variétés Bussard et Dream. Le rendement financier est calculé en se basant sur les données suivantes : a) prix du blé à la vente est de 10.4 €/qx; b) le prix de fongicide à l'hectare avec passage oscille entre 65 € et 67.5 € ; c) le prix du régulateur à l'hectare avec passage est 32.5 € ; d) pour les parcelles qui ont reçue en plus 40 N, le prix à l'hectare avec passage est de 40 €.....III-16
- 1-3-13 : Gain du rendement net à Everlange entre 2000 et 2003 des parcelles traitées par rapport aux témoins en kg/ha (A) et le gain et la perte financière en Euro/ha par rapport aux témoins (B). Les barres verticales représentent la variation d'Ecart-type. Le cercle représente la variation au sein de Dream en 2001.....III-17
- 1-3-14: Pourcentage des gains de rendement net des différents traitements par rapport au témoin à Everlange entre 2000 et 2003.....III-18
- 1-3-15 : Variation du gain de rendement en qx/ha en fonction du taux de symptômes enregistrés sur la F3 et la F4 et la fréquence de la population des F3 malades au moment de l'application des traitements GS37-GS39 et GS59. Les cercles représentent le meilleur seuil de préférence.....III-19
- 1-3-16 : Variation de la septoriose en fonction des différentes variantes testées sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) des variétés Bussard et Dream à Reuland et dans la Moselle (Emerange) pendant les années 2000, 2001 et 2003. Ces proportions représentent le niveau de la maladie enregistré entre la fin de la maturité laiteuse et le début de la maturité pâteuse.....III-20
- 1-3-17 : Variation du rendement net en qx/ha à Reuland pendant les années 2000 à 2001 et à Emerange en 2001 pour deux variétés Bussard et Dream.....III-21
- 1-3-18 : Gain du rendement net en Kg/ha à Christnach et Emerange en 2003 des parcelles traitées par rapport aux témoins et le gain et la perte financière en Euro/ha par rapport aux témoins .....III-21
- 1-3-19 : Relation entre l'amélioration des trois dernières feuilles et les gains en rendement entre 2000 et 2003. A : Everlange ; B : Christnach ; C : Emerange.....III-22
- 1-3-20 : Variation de l'AUDPC des trois dernières feuilles (F3, F2, F1) et le gain de rendement en kg/ha à Everlange entre 2000 et 2002.....III-23

1-3-21 :	Relation gain de rendement maladie en 2003. A/% de Surface verte (SV) et maladie (M) sur les trois dernières feuilles au stade GS77 (23 juin).B/Evolution de la septoriose (%) et réduction de la surface verte (%) enregistrée entre fin floraison (GS69) et maturité laiteuse en relation avec le gain de rendement. C/ Evolution de la septoriose (%) et réduction de la surface verte (%) enregistrée entre fin de maturité laiteuse et maturité pâteuse. D/ corrélation (* : significatif au seuil de 5%) entre septoriose, surface verte avec le gain de rendement dans les trois sites d'essais. ....	III-24
1-3-22 :	Variation du % de la surface foliaire présentant des symptômes de <i>Septoria tritici</i> de Bussard et des écarts (barres verticales) de cette dernière variété par rapport à Flair à Everlange et Reuland en 2000 et 2001. Les résultats du tableau représentent les résultats statistiques (Test d'égalité des espérances: deux observations de variances différentes) avec la variance (V) calculée pour chaque feuille de Bussard (1 <sup>ère</sup> colonne) et Flair (2 <sup>ème</sup> colonne), degré de liberté (D), Statistique t (St), probabilité P (T<= t) bilatéral (P), Valeur critique de t bilatéral (VC). NS = non significatif (P > 0.05), *=significatif (P < 0.05), **=hautement significative (P < 0.01).....	III-26
1-3-23 :	Variation de l'AUDPC de F1 et F2 de Flair en 2000 à Everlange et les principales périodes d'infections. H représente le nombre d'heures d'humidité de la classe comprise entre 90 et 100 % . ....	III-27

## PHOTOS

1-3-1 :	Différentes phases de la récolte réalisées en collaboration avec le Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück : A- La moissonneuse récolte le blé à l'échelle de chaque parcelle. B - Calcul du poids de grains à la parcelle. ....	III-3
---------	---	-------

## REFERENCES

- BANNON, F. J. & B. M. COOKE (1998). "Studies on dispersal of *Septoria tritici* pycnidiospores in wheat-clover intercrops." *Plant Pathology* **47**: 49-56.
- BROKENSHIRE, T. (1975). "The role of graminaceous species in the epidemiology of *Septoria tritici* on wheat." *Plant Pathology* **39**: 376-390.
- COAKLEY, S. M., L. R. MC DANIEL & G. SHANER (1985). "Model for predicting severity of *Septoria tritici* blotch on winter wheat." *Phytopathology* **75**: 1245-1251.
- CORNIC, G. & J. M. BRIANAIS (1991). "Partitioning of photosynthetic electron flow between CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> reduction in a C3 leaf (*Phaseolus vulgaris* L.) at different CO<sub>2</sub> concentrations and during drought stress." *Planta* **183**: 178-184.
- CORNISH, P. S., G. R. BAKER & G. M. MURRAY (1990). "Physiological responses of wheat (*Triticum aestivum*) to infection with *Mycosphaerella graminicola* causing *Septoria tritici* blotch." *Australian Journal of Agricultural Research* **41**: 317-327.
- EL JARROUDI, M., B. TYCHON & H. MARAITE (2002). Validation of "Proculture" model to predict *Septoria tritici* on winter wheat in the Grand-Duché of Luxembourg in 2001. VII Congress of the European Society for Agronomy. Cordoba. Spain. 15-18 July 2002. Book of Proceedings (Editors : Francisco J. Villalobos & Luca Testi). Consejería de Agricultura y Pesca. Congresos y Jornadas. ISBN 84-8474-059-5. pp. 275-276.
- EL JARROUDI, M., B. TYCHON, H. MARAITE, L. HOFFMANN & G. REILAND (2001). Validation of "Proculture" model to predict *Septoria tritici* development on winter wheat. 2nd International Symposium Modeling Cropping System. Florence. Italy. July 16-18, 2001. Book of Proceedings (Editors : M. Bardi, M. Donatelli, J. Porter, M.K. Van Ittersum. pp. 63-64.
- EYAL, Z. (1999). "The *Septoria tritici* and stagonospora nodorum blotch diseases of wheat." *European Journal of Plant Pathology* **105**: 629-641.
- EYAL, Z., A. L. SCHAREN, M. D. HUFFMAN & J. M. PRESCOTT (1985). "Global insights into virulence frequencies of *Mycosphaerella graminicola*." *Phytopathology* **75**: 1456-1462.
- HALAMA, P. (1996). "The occurrence of *Mycosphaerella graminicola*, teleomorpe of *Septoria tritici* in France." *Plant Pathology* **45**: 135-138.
- HUBER, L. (1987). Modélisation spatio-temporelle de la durée d'humectation d'un couvert végétal après une pluie. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique. Centre de Paris., Paris. France, I.N.A.P.G. 155 p.
- JAMES, W. C. (1976). Manual of plant growth stages and diseases assessment keys. Ministry of Agriculture Fisheries. Food. (sans volume).
- KING, J. E., R. J. COOK & S. C. MELVILLE (1983). "A review of *Septoria* diseases of wheat and barley." *Ann. Appl. Biol.* **103**: 345-373.
- MADEIRA, A. C., J. A. CLARK & S. ROSSALL (1994). "Growth and light interception in field bean (*Vicia faba*) infected by *Ascochyta fabae*." *Journal of Agricultural Science* **123**: 225-232.
- MAGBOUL, A. M., S. GENGS, D. G. GILCHRIST & L. F. JACKSON (1992). "Environmental influence on the infection of wheat by *Mycosphaerella graminicola*." *Ecology and epidemiology publication* **82**: (12) 1407-1413.
- MURRAY, G. M., R. H. MARTIN & B. R. CULLIS (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.
- ROYLE, D. J., M. W. SHAW & R. J. COOK (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.
- ROYLE, D. J., D. J. LOVELL, S. M. COAKLEY & G. SHANER (1993). Predicting the effects of climate change on *Septoria tritici* on winter wheat. Abstracts of the 6th International Congress of Plant Pathology. Montreal, Canada. **5.1.7 (abstract)**.
- SHANER, G. & R. E. FINNEY (1977). "The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in knox wheat." *Phytopathology* **67**: 1051-1056.

- SHAW, M. W. (1987). "Assessment of upward movement of rain splash using a fluorescent tracer method and its application to the epidemiology of cereal pathogens." Plant Pathology **36**: 201-213.
- SHAW, M. W. (1991). "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. & D. J. ROYLE (1989a). "Airborne inoculum as a major source of *Septoria tritici* (*Mycosphaerella graminicola*) infections in winter wheat crops in the U.K." Plant Pathology **38**: 35-43.
- SHAW, M. W. & D. J. ROYLE (1989b). "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. & D. J. ROYLE (1993). "Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) on winter wheat in the U.K." Plant Pathology **42**: 882-899.
- SHIPTON, W. A., W. R. J. BOYD, A. A. ROSIELLE & B. L. SHEARER (1971). "The common *Septoria* diseases of wheat." Bot.Rev. **37**: 231-262.
- SHTIENBERG, D. (1992). "Effects of foliar diseases on gas exchange processes : a comparative study." Phytopathology **82**: 760-765.
- SKIDMORE, A. M. (1993). "Les applications fractionnées à doses réduites doivent être abandonnées !" Perspectives agricoles **185**: 119-124.
- THOMAS, M. R., R. J. COOK & J. E. KING (1989). "Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its affect on yield." Plant Pathology **38**: 246-257.
- TOMERLIN, J. R. & A. HOWELL (1988). "Distrain : a computer program for training people to estimate disease severity on cereal leaves." Plant Dis. **72**: 455-459.
- VAN GINKEL, M. & A. L. SCHAREN (1988). "Host-pathogen relationship of wheat and *Septoria tritici*." Phytopathology **78**: 762-766.
- VERRET, J. A. & G. M. HOFFMANN (1990). "A biological oriented treshold decision model for control of epidemics of *Septoria nodorum* in wheat." The American Phytopathological Society. Plant diseases **74**: 701-708.
- ZADOKS, J. C. (1985). "On the conceptual basis of crop loss assessment : the threshold theory." Ann. Rev. Phytopathol. **23**: 455-473.
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG & C. F. KONZAK (1974). "A decimal code for the growth stages of cereals weeds." Research **14**: 415-421.
- ZUCKERMAN, E., A. ESHEL & Z. EYAL (1997). "Physiological aspects related to tolerance of spring wheat cultivars to *Septoria tritici* blotch." Phytopathology **87**: 60-65.

---

## CHAPITRE IV

### EPIDÉMIOLOGIE DE LA ROUILLE BRUNE AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

---

---

La rouille brune a connu un développement très important au Grand-Duché de Luxembourg entre 1999 et 2003. En 2000 et 2001, les essais variétaux ont révélé un effet hautement significatif des variétés dans les trois sites d'essai (Everlange, Reuland et la Moselle). En 2000, le développement de la maladie a été très précoce dans les trois sites d'essai. Le recours au traitement fongicide a été indispensable dans les trois sites. Par contre, en 2001, cette maladie a eu une apparition tardive et le taux maximal de la maladie a été enregistré pendant la maturité pâteuse. Le traitement réalisé au stade GS31 n'a pas assuré la protection des deux dernières feuilles. En 2003, l'évolution de la maladie a été spectaculaire dans la Moselle luxembourgeoise. La présence de la maladie a été enregistrée dès l'épiaison. Seuls les traitements réalisés après le stade GS39 ont assuré une bonne protection des trois dernières feuilles.

---

#### I. Introduction

La rouille brune, dont l'agent est *Puccinia recondita* f.sp. *tritici*, est responsable de pertes fréquentes et importantes du rendement en Europe du Nord (BURLEIGH *et al.*, 1972; SHOLES, 1992). Plusieurs auteurs ont signalé le besoin d'évaluer très tôt quantitativement les conséquences des altérations provoquées par le champignon sur la plante hôte. Bien que les fonctions physiologiques de la réponse de la feuille aux maladies ont été largement étudiées comme des effets globaux, la quantification précise des symptômes de la maladie et de l'ampleur des dégâts subis par la plante hôte est souvent insuffisante dans la littérature pour la modélisation de ces processus.

Ce champignon entraîne le plus souvent une baisse de la photosynthèse des tissus infectés. Lorsque la maladie progresse, le rapport chlorophylle a /chlorophylle b diminue (MAC GRATH & PENNYPACKER, 1990). La perte d'eau accélérée a été généralement attribuée à la rupture de l'épidémie provoquée par le pathogène au moment de la sporulation, tandis que la réduction d'activité photosynthétique provoquerait une augmentation de la concentration interne de CO<sub>2</sub> impliquant la fermeture des stomates, une augmentation de la résistance foliaire, et donc une diminution de la transpiration (BETHENOD *et al.*, 2001). La perturbation de la photosynthèse par la rouille brune a été quantifiée dans plusieurs études mais les résultats sont assez contradictoires. Selon les travaux de SHTIENBERG (1992) au champ, *P. recondita* a une action légèrement plus grande que son effet visible. SHTIENBERG (1992) considère que la rouille brune modifie la photosynthèse de 20 % à 40 % dans un couvert mais seulement très peu la respiration.

La nuisibilité causée par la rouille brune est plus difficile à aborder car les symptômes développés sont complexes, ce qui rend plus délicat l'établissement des relations entre eux et les dommages. Cette difficulté apparaît clairement à travers les résultats

contradictoires sur la quantification des effets des rouilles sur la photosynthèse (SCHOLES & FARRAR, 1986 ; MAC GRATH & PENNYPACKER, 1990 ; SPITTERS *et al.*, 1990 ; SCHOLES, 1992 ; SHTIENBERG, 1992).

L'influence des conditions climatiques sur les différents processus du cycle primaire de la rouille brune a été largement étudiée (EVERSMEYER *et al.*, 1980 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 1995 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 2000 ; SACHE, 2000 ; SACHE, 2002). La durée d'humectation, le taux d'humidité relative et la température sont les variables qui influencent le plus la pénétration, la germination, la colonisation et la sporulation de la rouille brune du blé (CLIFFORD & HARRIS, 1981 ; HAU & DE VALAVIEILLE-POPE, 1998 ; SACHE, 2000).

La rouille brune est la maladie fongique la plus fréquente et la plus grave dans les régions méridionales de la France. Au nord de la France, en Belgique et au Grand-Duché de Luxembourg, la rouille brune peut faire son apparition plus tardivement dans la saison. Seulement, dernièrement, cette maladie est apparue de façon explosive en période d'épiaison-floraison, elle a atteint des seuils très importants pendant la maturité et a commencé à conquérir beaucoup d'espaces dans le nord de l'Europe qui ont été complètement dominé par *Septoria tritici*. Dans leurs observations au champ (ROBERT, 2003), les chercheurs signalent que les épidémies de rouille brune pouvaient être totalement stoppées par le développement de la septoriose. Les deux maladies coexistent sur les plantes malades mais la rouille brune, parasite biotrophe, ne se développe que sur les tissus vivants et ne peut donc s'étendre sur les tissus contaminés et tués par la septoriose (parasite nécrotrophe) alors que la septoriose recouvre les lésions de rouille. Ainsi, la rouille ne se développe que lorsque les conditions climatiques lui sont favorables et qu'elle est en avance sur la septoriose. Une course de vitesse existe donc entre la rouille qui infecte tous les étages du couvert et la septoriose qui se propage de feuille en feuille du bas vers le haut de la plante. Ainsi, l'évolution de la rouille brune ces dernières années montre que les conditions climatiques lui ont été favorables.

L'objectif de ce chapitre est de décrire l'épidémie de cette maladie dans nos essais au Grand-Duché de Luxembourg et de comprendre les conditions météorologiques qui ont été à l'origine de son expansion.

## II. Matériels et méthodes

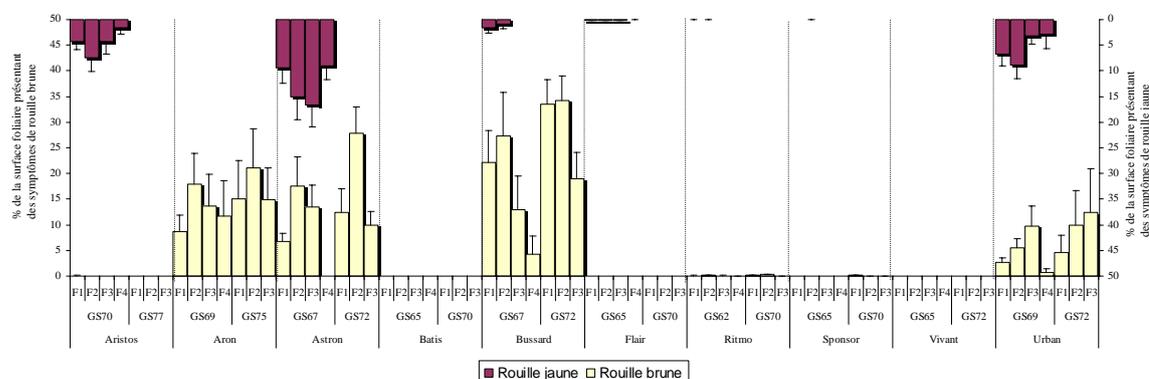
Un protocole expérimental a été mis en place pendant quatre années d'observations (le protocole expérimental est détaillé dans le chapitre II de cette première partie) pour identifier les maladies affectant la culture du blé au Grand-Duché de Luxembourg. Ce protocole comprend un témoin et des traitements fongicides (4 répétitions pour chaque variante testée au sein de chaque variété mise en essai) réalisés aux différents stades de la culture (à partir du stade GS31). Le suivi de la rouille brune pendant les campagnes d'observations a été quantitatif (% de la surface foliaire présentant des symptômes) et qualitatif (délimitation des aires de dispersion de la maladie).

La quantification de la maladie a été réalisée selon les échelles de sévérité de JAMES (1976) et le logiciel Distrain.(TOMERLIN & HOWELL, 1988) La comparaison entre les deux variantes a été basée sur le calcul de l'AUDPC (SHANER & FINNEY, 1977) des trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) entre deux stades de croissance de blé d'hiver.

### III- Résultats

#### III.1. Année 1999

Des étages foliaires présentant des lésions sporulantes de *Puccinia recondita* ont été quantifiés à partir de l'épiaison à Everlange en 1999. Cependant, la répartition de la maladie était très hétérogène (figure 1-4-1) et la différence entre variétés était très hautement significative ( $P < 0.001$ ).



**Figure 1-4- 1 : Variation de la rouille brune et la rouille jaune dans chacun des trois étages foliaires supérieurs à Everlange en fonction de variétés en 1999. Echelle en abscisse correspond respectivement aux trois dernières feuilles, stades phénologiques selon ZADOKS *et al.* (1974) et les variétés.**

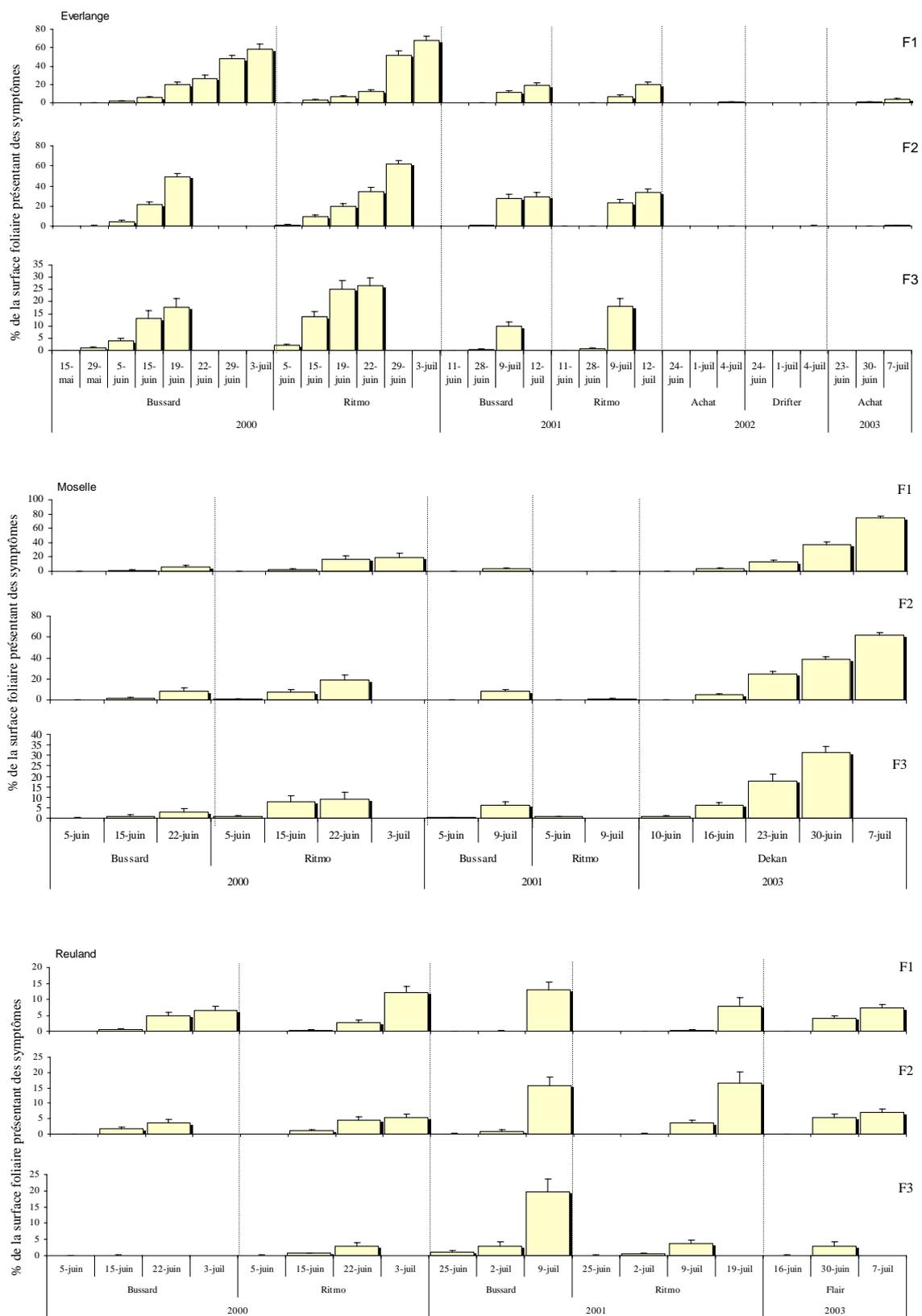
La différence de comportement variétal a été nettement remarquable en 1999 à Everlange. Ainsi, la variété Aristos, ne présentait aucun symptôme de la rouille brune pendant toute la période d'observation, tandis que Bussard se distinguait déjà nettement par sa grande susceptibilité des autres variétés à l'épiaison. Au stade maturité laiteuse, la maladie a atteint un niveau important de son expansion. En 1999, une compétition très importante a été observée entre les deux rouilles (jaune et brune) pour envahir les surfaces vertes. Les trois dernières feuilles d'Aristos et Urban (figure 1-4-1) ont été envahies par les deux champignons.

#### III.2. Evolution de la rouille brune de 2000 à 2003

##### III.2.1. Everlange

La rouille brune a été spectaculaire à Everlange en 2000 surtout pour Ritmo et Bussard. Le maximum de la maladie a été enregistré au début de la maturité laiteuse pour F3 et au début de la maturité pâteuse pour F2 et à la fin de la maturité pâteuse pour F1 (photo 1-4-1, figure 1-4-2).

A l'échelle de la feuille, la maladie provoque principalement une baisse de photosynthèse due à une diminution de la surface verte photosynthétique liée à la présence de lésions, à la réduction de croissance foliaire et à l'accélération de la sénescence des feuilles malades.



**Figure 1-4- 2 : Variation de la rouille brune sur les trois dernières feuilles entre 2000 et 2003 à Everlange, la Moselle et à Reuland. N.B : pour une question de précision les échelles sont différents entre les différents graphiques.**

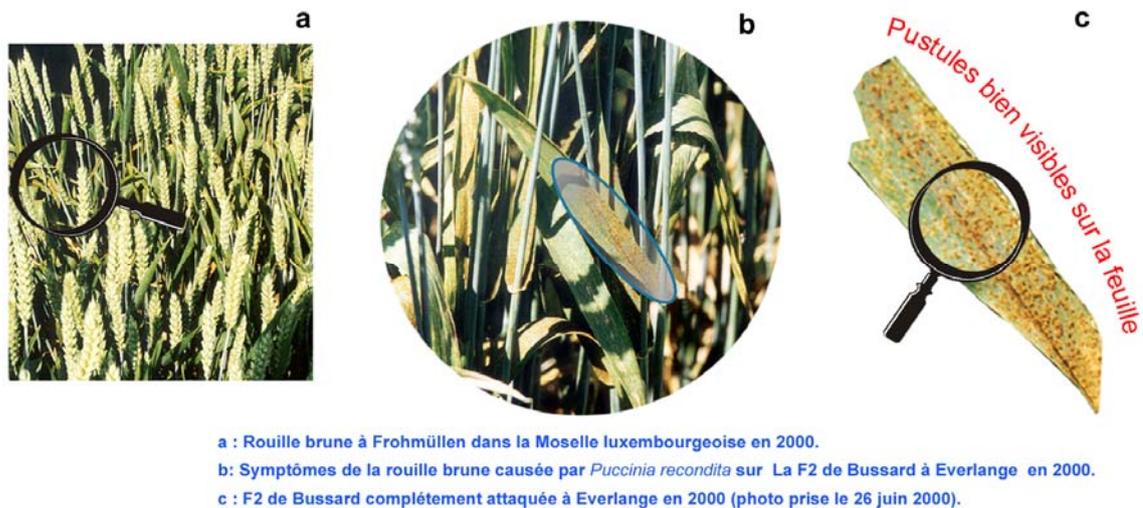


Photo 1-4- 1 : Symptômes de la rouille brune en 2000 à Everlange et dans la Moselle luxembourgeoise.

Le comportement variétal a été nettement distingué à Everlange ( $P < 0.001$ ). La classification de Duncan (méthode basée sur l'analyse de la variance proc ANOVA du logiciel SAS) a révélé un comportement qui tend vers la résistance pour Dream et Flair en 2000 et 2001 (figure 1-4-3). Ritmo a été la variété la plus attaquée suivi de Bussard. La procédure Lifereg a confirmé la classification établie par la méthode de Duncan.

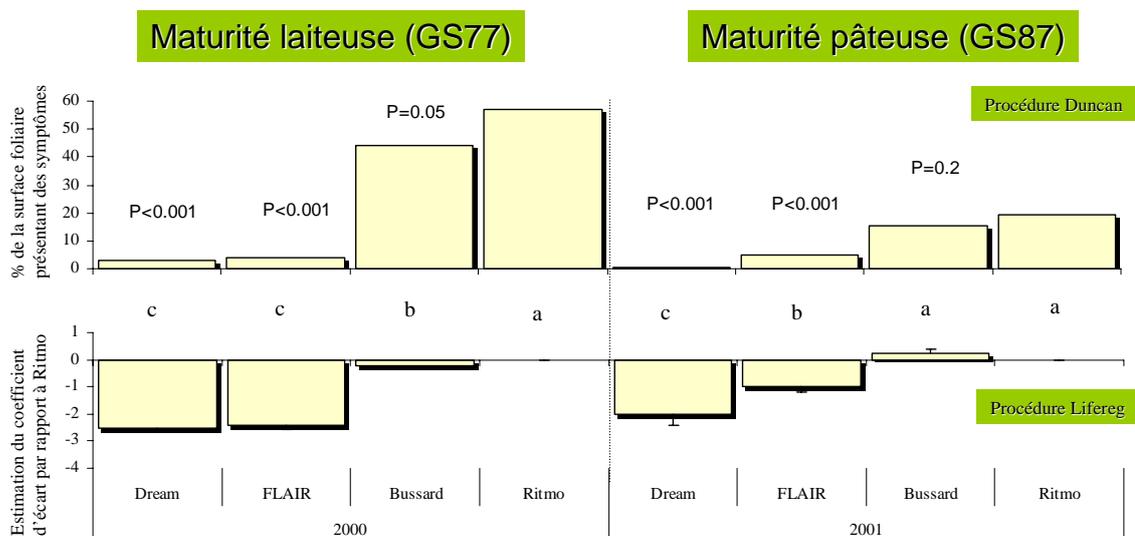
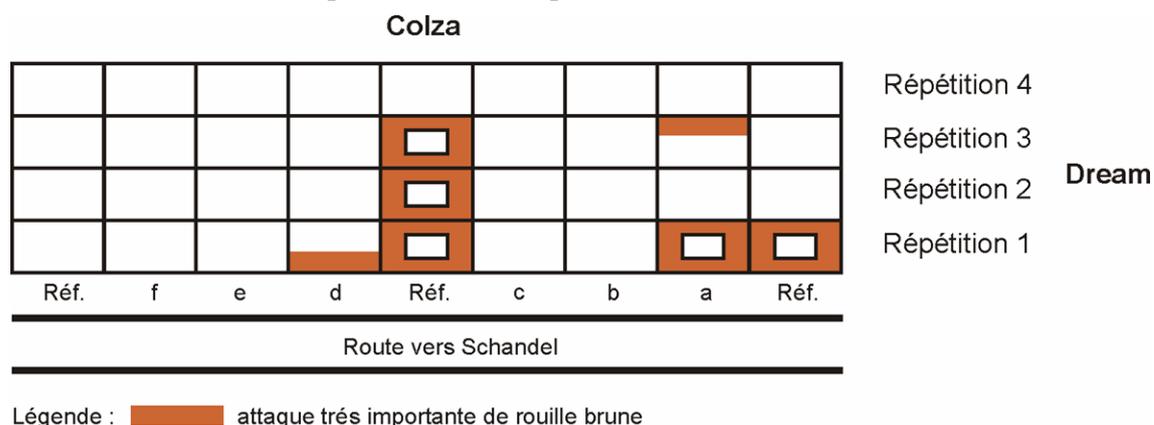


Figure 1-4- 3 : Classification selon la procédure Duncan (haut) et Lifereg (bas) des variétés en fonction de l'intensité de la maladie enregistrée sur F1 et F2 à Everlange au stade maturité laiteuse en 2000 et au stade maturité pâteuse en 2001. La procédure Lifereg consiste à comparer les coefficients estimés par une régression par rapport à la valeur zéro pour une variété de référence (Ritmo dans notre cas). Pour chaque année, les lettres différentes représentent une différence significative et la valeur de la probabilité calculée est donnée en haut de la figure au seuil de 5 % et 1 %.

La dispersion de la maladie dans les couverts végétaux à l'intérieur des parcelles d'essais a surtout été étudiée qualitativement dans sa dimension horizontale. Les aires de dispersion de la maladie ont été suivies dès la détection de la première pustule (figure 1-4-4). Les parcelles qui se trouvaient du côté de la route de Schandel étaient plus attaquées que les parcelles qui se situaient à l'opposé. Cette question de direction de dispersion de la maladie à partir d'un foyer a intéressé les chercheurs depuis les

années 60. Elle a été modélisée soit par un modèle puissance (GREGORY, 1968 ; MUNDT & LEONARD, 1985), soit par un modèle exponentiel (KIYOSAWAS & SHIYOMI, 1972).



**Figure 1-4- 4 : Situation de la rouille brune à Everlange pendant le stade de maturité laiteuse en 2000.**

Ces études ont modélisé des gradients, aplatis dans la direction des vents dominants, traduisant le dépôt progressif des spores à partir du foyer. EVERSMEYER & KRAMER (1980) ont montré l'importance de l'orientation du vent dans la dispersion des spores de rouille à 15 cm au-dessus du couvert, résultat qui a été confirmé par les travaux de ROELS & MARTELL (1984).

En 2001, la maladie a été tardive par rapport à 2000 et son taux de multiplication a atteint le maximum au stade maturité pâteuse (figure 1-4-2). En 2002 et 2003, la rouille brune a été tardive et très négligeable à Everlange.

### III.2.2. Moselle

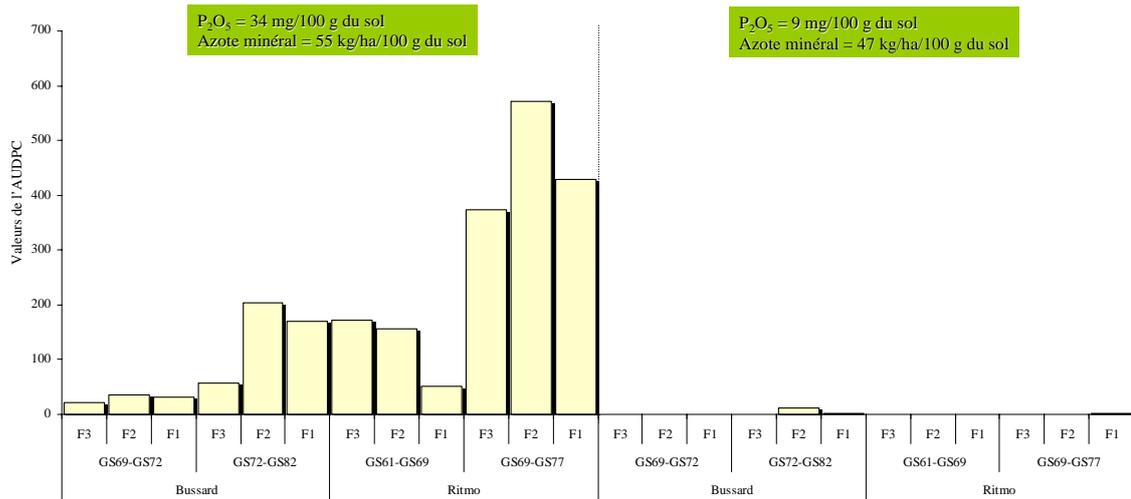
En Moselle luxembourgeoise, la rouille brune constitue la principale maladie du blé d'hiver. Cette maladie a été quantifiée pendant les deux campagnes de mesure (2000 et 2001) qui ont été réalisées dans le cadre de cette thèse et en 2003 dans le cadre du projet Sintama coordonné par le Centre de Recherche Publique Gabriel Lippmann (figure 1-4-2).

En 2000, cette maladie a été repérée avec des taux de multiplication des symptômes très importants sur les plants situés dans la première ligne du champ par rapport à ceux qui se trouvaient à l'intérieur, où la maladie était très négligeable.

L'hypothèse la plus plausible est la variation de la nutrition minérale entre les deux parties du champ qui a coïncidé avec une variété susceptible et les conditions météorologiques favorables.

Pour répondre à cette question, nous avons analysé le 19 juin 2000 (début de la maturité du blé) des échantillons de sol des parcelles de la première ligne du champ avec des échantillons issus de l'intérieur du champ (cf. chapitre I de cette partie pour les résultats d'analyses).

Les résultats de notre quantification montrent que la maladie était plus importante dans les parcelles avec une dose de  $P_2O_5$  de 34 mg/100 g du sol (première ligne) qu'avec une dose de phosphore de 8 mg /100 g du sol (figure 1-4-5).



**Figure 1-4- 5 : Variation de l'AUDPC standard entre les parcelles avec une dose de  $P_2O_5$  de 34 mg/100 g du sol et une dose de phosphore de 8 mg/100 g du sol.**

En effet, la rouille brune est un parasite biotrophe qui ne se développe que sur les tissus vivants et ne peut donc s'étendre sur les tissus contaminés et tués par un autre parasite (ROBERT, 2003). La forte dose de phosphore dans les premières lignes a favorisé une croissance assez importante des plantes. (cf. Partie I, chapitre VII de cette thèse, figure 1-3-3) ainsi qu'une grande densité foliaire. Avec cette hauteur atteinte, les plantes ont plus tendance à se chevaucher et à ombrager la couverture végétale (entre la F1 et les feuilles situées à la base, F1 est la dernière feuille formée), ce qui a créé une humidité ambiante entre les plantes favorable au parasite. De plus, ROBERT (2003), suggère que la densité foliaire est le facteur principal de la dispersion des spores de rouille brune.

La rouille brune a été plus importante en 2000 qu'en 2001 où seule la variété Bussard a été affectée par la maladie avec un maximum de multiplication enregistré pendant la fin de maturité pâteuse (9 juillet 2001). Pendant 2000 et 2001, la rouille brune a été enregistrée à des stades tardifs du blé d'hiver mais en 2003, la présence de la maladie a été enregistrée dès l'épiaison (figure 1-4-2).

La variation de la maladie est statistiquement très hautement significative entre les sites. Ce qui implique que le microclimat de chaque site favorise l'effet régional de certaines maladies.

### III.2.3. Reuland

A Reuland, la maladie a été observée en 2000 et 2001 mais avec un taux inférieur à celui enregistré à Everlange et dans la Moselle. En 2003, le taux de maladie a été plus important à Reuland qu'à Everlange.

### III.3. Effet du traitement

Le choix du moment optimum d'application de traitement fongicide constitue une des grandes contraintes de l'épidémiologiste. La maladie est très variable selon les années. Elle est très précoce pendant certaines années et très tardive pendant d'autres.

A Everlange en 2000, la maladie était très précoce, elle a déjà été détectée à l'épiaison et donc les traitements GS59 (Allegro 1 l/ha) et GS59+40N ont eu un effet sur les périodes survenues après l'épiaison. Les résultats du test de Tukey révèlent que tous les traitements appliqués à Everlange ont eu un effet significatif par rapport au témoin. Aucune différence significative n'a été révélée entre les traitements (figure 1-4-6). Le double traitement fongicide dans la Moselle (GS45 + GS59) et à Reuland (GS39 + G59) a assuré une bonne protection des trois dernières feuilles.

En 2001, la maladie était très tardive par rapport à l'année 2000 dans les trois sites étudiés. Un traitement précoce réalisé au stade GS32 (Allegro 1 l/ha) à Everlange, n'a eu aucun effet sur la protection des feuilles F1 et F2 (ces dernières n'avaient pas encore été émergées à ce stade). Le niveau de la maladie sur ces deux dernières feuilles est proche ou légèrement supérieur au témoin à la maturité. Les deux traitements réalisés au stade GS32 (Opus team 1.5 l/ha) et au stade GS59 (Allegro 1 l/ha) ont assuré une bonne protection des trois dernières feuilles dans les trois sites d'essai.

En 2003, tous les traitements réalisés à partir du stade GS37 avec Opéra 1.5 l/ha ont assuré une bonne protection des trois dernières feuilles à Everlange et Christnach. Aucune différence significative n'a été enregistrée entre le traitement qui a été réalisé au stade GS32 (Opéra 1.5l/ha) et le témoin. Enfin, en Moselle (figure 1-4-6), ce sont surtout les traitements tardifs réalisés à partir du stade GS39 et les doubles traitements qui ont assuré une bonne protection des trois dernières feuilles.

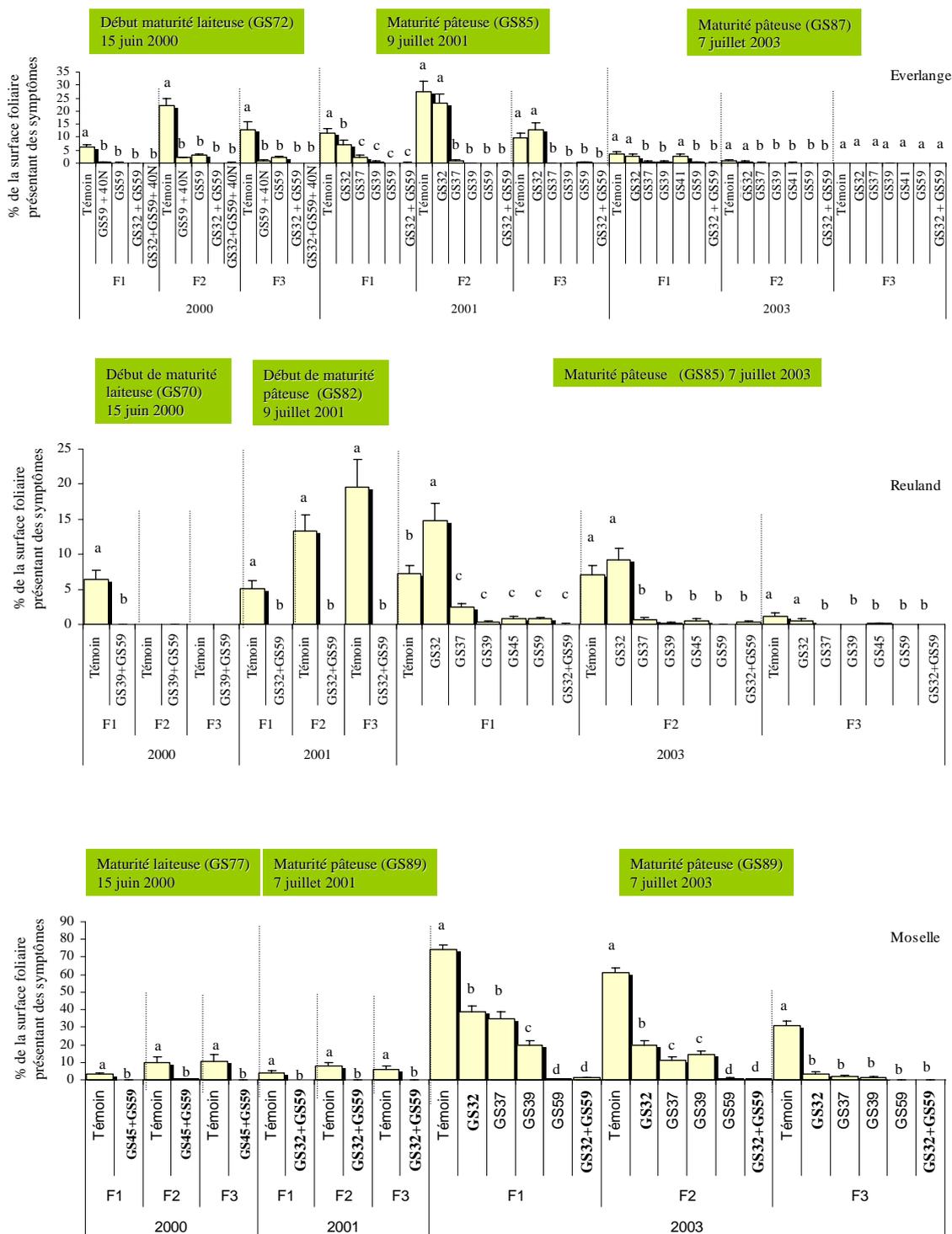
A Everlange, la relation entre le rendement relatif (%) (le rendement relatif des parcelles traitées est calculé par rapport au témoin qui représente 100 %) des parcelles ayant reçu le traitement fongicide et la différence de maladie (moyenne des trois dernières feuilles) par rapport au témoin pendant la maturité révèle l'importance de réaliser un traitement contre cette maladie en 2000 et 2001 (figure 1-4-7 A). En 2002, le niveau de maladie était très négligeable et aucun traitement ne se justifiait.

La différence variétale se remarque nettement en 2000 et 2001 à Everlange entre les variétés très sensibles telles que Bussard et Ritmo et les variétés résistantes telles que Flair et Dream.

A Reuland en 2001, seul Bussard présente des pourcentages significatifs de la maladie par rapport aux parcelles traitées. La relation du rendement relatif (%) et la différence de la maladie par rapport au témoin mettent en évidence cette relation (figure 1-4-7 B).

En Moselle luxembourgeoise, la relation entre le rendement relatif (%) et la différence de la maladie en % par rapport au témoin indique une efficacité du traitement seulement sur Ritmo en 2000 et Bussard en 2001 (figure 1-4-7 C).

En 2003, le meilleur gain de rendement par rapport au témoin est obtenu par le traitement GS39 qui se démarque nettement des autres traitements appliqués (figure 1-4-7 D). Ce traitement a assuré la meilleure rentabilité économique et financière en Moselle en 2003.

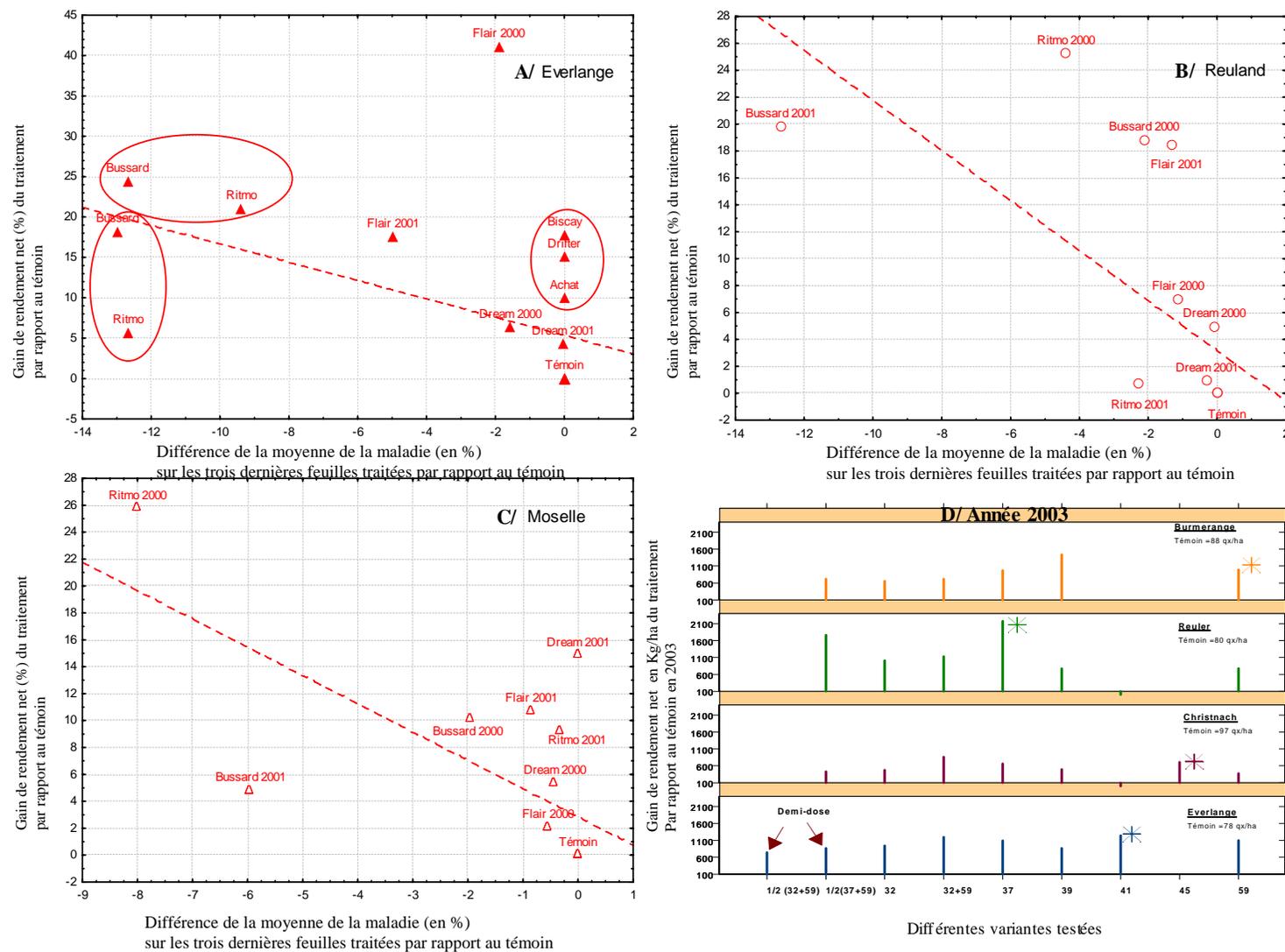


**Figure 1-4- 6 : Variation de la rouille brune au stade maturité sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) dans les trois sites d'essai pendant les années 2000, 2001 pour la variété Bussard et 2003 pour la variété Achat à Everlange, Flair à Christnach et Dekan à Burmerange. Les différentes lettres représentent une différence significative au seuil de 5% pour chaque feuille (la classification a été faite par la méthode Tukey chaque année et pour chaque feuille). En abscisse ce sont respectivement du haut en bas les différentes variantes testées, les trois dernières feuilles et l'année d'observation.**

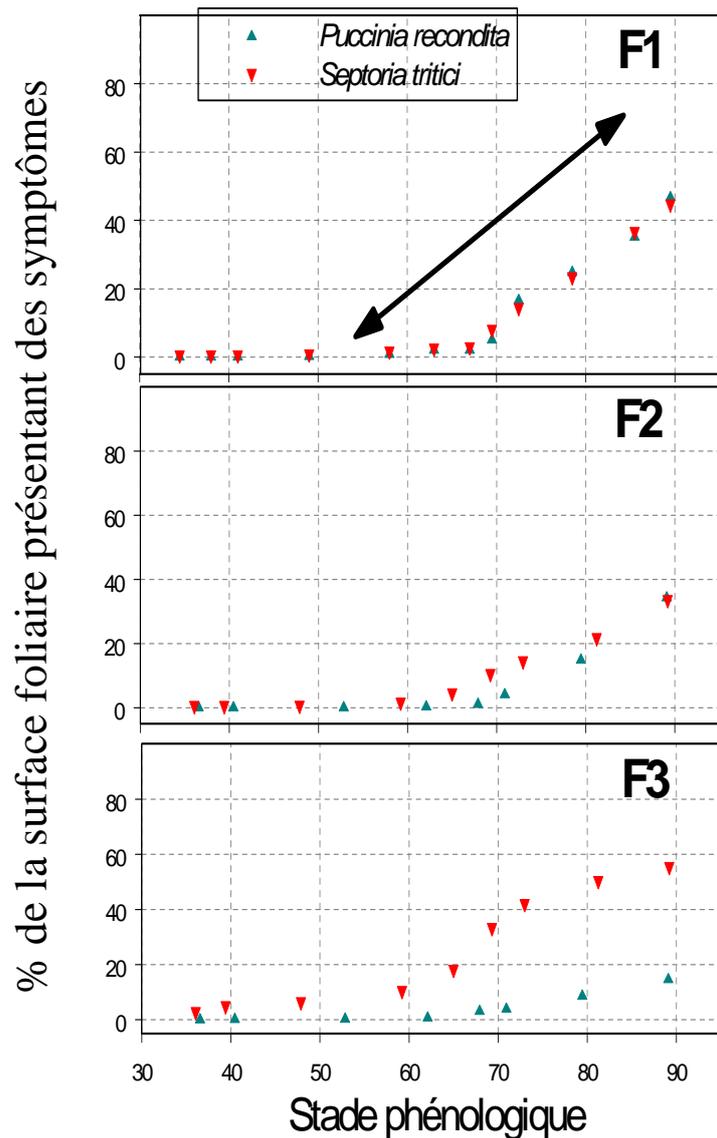
## IV. Discussion

La rouille brune a connu un développement spectaculaire ces cinq dernières années au Grand-Duché de Luxembourg particulièrement pendant les années 1999-2000 et 2001 à Everlange et en 2000, 2001 et 2003 en Moselle luxembourgeoise. Ce travail a permis de distinguer certaines interactions et concurrences entre la rouille brune et la septoriose des feuilles causée par *Septoria tritici* au niveau de leurs développements.

La rouille brune est dominante dans les endroits à faible intensité de la septoriose (Moselle). Les deux parasites coexistent mais seulement pendant la période où la surface de la feuille est verte. En effet, la rouille brune est un parasite biotrophe, qui ne se développe que sur les feuilles vivantes. Une course est observée entre la rouille qui se propage vite sur tous les étages foliaires et la septoriose qui suit un gradient vertical des feuilles situées à la base de la tige vers les feuilles situées au sommet du couvert végétal. La rouille brune est nettement remarquable sur les feuilles encore vertes et au fur et à mesure que la feuille se dessèche, les lésions de la rouille sont recouvertes par la septoriose (figure 1-4-8). Ainsi, cette maladie est observée à la fin de la saison uniquement sur les deux derniers étages foliaires (figure 1-4-9).



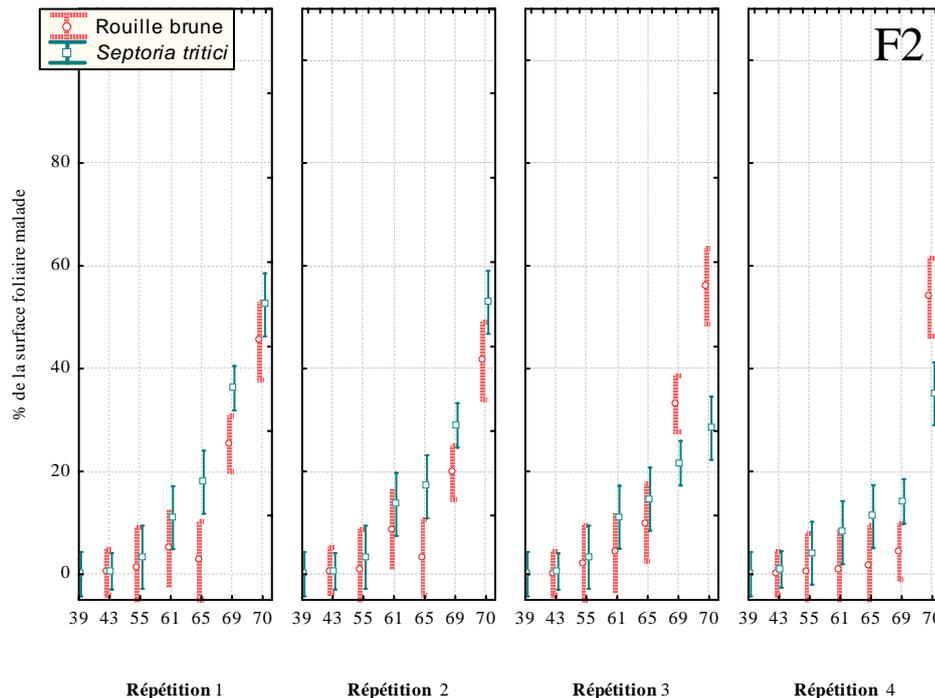
**Figure 1-4- 7 :** Relation du gain de rendement net (%) des parcelles traitées et la différence de maladie par rapport au témoin pendant trois années 2000, 2001 et 2002 à Everlange. (A) ; en 2000 et 2001 à Reuland (B) et dans la Moselle (C). La figure D représente le gain de rendement net (kg/ha) en 2003 des différentes variantes testées dans les quatre sites.



**Figure 1-4- 8 : Interaction entre la rouille brune et la septoriose des feuilles causée par *Septoria tritici* à Everlange en 2000.**

Par ailleurs, nous avons observé une évolution ultérieure importante de la septoriose dans les parcelles qui ont été attaquées par la rouille brune. Ce qui laisse supposer que la rouille brune favorise indirectement l'installation et le développement de la septoriose (figure 1-4-9).

Cette interaction entre ces deux parasites n'a jamais été abordée dans les modèles épidémiologiques et en particulier dans les modèles d'avertissements.



**Figure 1-4- 9 : Evolution de la rouille brune et de la septoriose causée par *Septoria tritici* sur la F2 de Bussard à Everlange en 2000. En abscisse le stade phénologique selon ZADOKS *et al.* (1974).**

### Effet sur le rendement

Pour comprendre les stades phénologiques qui sont en jeu dans la définition du rendement, nous avons réalisé une étude de corrélation associée à un test de signification entre le rendement relatif (%) et la différence de maladie du traitement par rapport au témoin en 2000, 2001 à Everlange et 2003 pour Burmerange. Cette étude a été réalisée pendant trois stades GS65, GS72 et GS87 à Everlange (tableau 1-4-1) et deux stades GS77 et GS87 pour Burmerange 2003 (tableau 1-4-2).

Cette étude de corrélation montre un très bon ajustement significatif en 2000 entre la maladie enregistrée sur les trois dernières feuilles pendant la maturité laiteuse et le rendement. Cet ajustement reste important pendant toute la phase de maturité.

Cependant, cette corrélation n'est pas très importante pendant la floraison à part sur F1 de Bussard qui a connu une relation très importante en 2000.

En 2001, la corrélation entre le rendement et la maladie n'était pas très importante par rapport à 2000. Une corrélation moyenne se dégageait entre la maladie enregistrée à la maturité laiteuse et le rendement pour la variété Bussard. Cependant, aucune relation n'a été enregistrée pour la variété Ritmo.

Donc en 2001, la maladie a été très tardive et n'a pas eu d'effets considérables sur la chute du rendement.

A Burmerange en 2003, le meilleur ajustement entre la maladie et la chute du rendement est enregistré en pleine maturité laiteuse (GS77). La relation est presque équivalente pour les trois dernières feuilles.

La rouille brune entraîne une perturbation de l'assimilation du CO<sub>2</sub> par la baisse de la surface photosynthétisante due à la présence de lésions et à une accélération de la sénescence. Elle conduit également à une perturbation de la surface verte des feuilles infectées qui affecte le rendement.

**Tableau 1-4- 1 : Corrélation entre le rendement relatif (%) et la différence de maladie par rapport au témoin enregistré sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) de deux variétés (Bussard et Ritmo) à Everlange en 2000 et 2001. (\*) P < 0.05**

		GS65		GS72		GS87	
		2000	2001	2000	2001	2000	2001
Bussard	F1	- 0.9*	0	- 0.93*	- 0.77	- 0.94*	- 0.59
	F2	- 0.7	0.15	- 0.93*	- 0.6	- 0.94*	- 0.62
	F3	- 0.7	- 0.03	- 0.92*	- 0.6	-	-
Ritmo	F1	- 0.64	0	- 0.92*	0	- 0.9*	0.58
	F2	- 0.39	- 0.39	- 0.93*	- 0.39	- 0.94*	- 0.18
	F3	- 0.58	- 0.32	- 0.9*	- 0.1	-	-

**Tableau 1-4- 2 : Corrélation entre le rendement relatif (%) et la différence de maladie par rapport au témoin enregistré sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) de Dekan à Burmerange en 2003. (\*) P < 0.05**

	GS77	GS87
F1	- 0.76*	<b>- 0.62</b>
F2	- 0.77*	<b>- 0.69</b>
F3	<b>- 0.79*</b>	-

## V. Conclusion

Cette étude a montré l'importance de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg. Cette maladie pourrait contribuer significativement à la chute du rendement final si les alertes relatives à cette maladie ne sont pas diffusées à temps. Une grande interaction et compétition existent entre la rouille brune et la septoriose. SCHOLÉS (1992) a souligné que la diversité des réponses aux maladies observées chez la plante hôte provient de l'interaction de facteurs variés, comme la résistance de plante, son stade de développement, les conditions culturales, la virulence du pathogène, la sévérité de l'attaque, ainsi que l'interaction avec d'autres stress biotiques (parasite) ou abiotiques (hydrique, rayonnement).

La rouille brune constitue la principale maladie de la Moselle luxembourgeoise, elle se répète au fil des années et à des moments cruciaux de la croissance du blé d'hiver. Au début, cette maladie apparaissait à la fin de la maturité mais ces dernières années, la présence de la maladie est enregistrée dès l'épiaison, d'où l'intérêt d'étudier les paramètres météorologiques qui favorisent cette maladie. L'étude concernant l'effet du climat sur le développement de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg est détaillé dans le chapitre II de la deuxième partie de cette thèse. Enfin, la quantification des paramètres de la rouille brune du blé d'hiver et les effets des variables externes qui les influencent sont des éléments de base dans la modélisation de cette maladie. Chaque phase du cycle d'infection peut être modélisée séparément, de l'infection à la croissance de lésion et la dispersion des spores vers les autres plantes (HAU & DE VALAVIELLE-POPE, 1998).

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

- 1-4- 1 : Corrélacion entre le rendement relatif (%) et la différence de maladie par rapport au témoin enregistré sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) de deux variétés (Bussard et Ritmo) à Everlange en 2000 et 2001. (\*) P < 0.05 .....IV-14
- 1-4- 2 : Corrélacion entre le rendement relatif (%) et la différence de maladie par rapport au témoin enregistré sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) de Dekan à Burmerange en 2003 . (\*) P < 0.05 .....IV-14

## FIGURES

- 1-4- 1 : Variation de la rouille brune et la rouille jaune dans chacun des trois étages foliaires supérieurs à Everlange en fonction de variétés en 1999. Echelle en abscisse correspond respectivement aux trois dernières feuilles, stades phénologiques selon ZADOKS *et al.* (1974) et les variétés.....IV-3
- 1-4- 2 : Variation de la rouille brune sur les trois dernières feuilles entre 2000 et 2003 à Everlange, la Moselle et à Reuland. N.B : pour une question de précision les échelles sont différents entre les différents graphiques. ....IV-4
- 1-4- 3 : Classification selon la procédure Duncan (haut) et Lifereg (bas) des variétés en fonction de l'intensité de la maladie enregistrée sur F1 et F2 à Everlange au stade maturité laiteuse en 2000 et au stade maturité pâteuse en 2001. La procédure Lifereg consiste à comparer les coefficients estimés par une régression par rapport à la valeur zéro pour une variété de référence (Ritmo dans notre cas). Pour chaque année, les lettres différentes représentent une différence significative et la valeur de la probabilité calculée est donnée en haut de la figure au seuil de 5 % et 1 %. ....IV-5
- 1-4- 4 : Situation de la rouille brune à Everlange pendant le stade de maturité laiteuse en 2000. ....IV-6
- 1-4- 5 : Variation de l'AUDPC standard entre les parcelles avec une dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 34 mg/100 g du sol et une dose de phosphore de 8 mg/100 g du sol. ....IV-7
- 1-4- 6 : Variation de la rouille brune au stade maturité sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) dans les trois sites d'essai pendant les années 2000, 2001 pour la variété Bussard et 2003 pour la variété Achat à Everlange, Flair à Christnach et Dekan à Burmerange. Les différentes lettres représentent une différence significative au seuil de 5% pour chaque feuille (la classification a été faite par la méthode Tukey chaque année et pour chaque feuille). En abscisse ce sont respectivement du haut en bas les différentes variantes testées, les trois dernières feuilles et l'année d'observation.....IV-9
- 1-4- 7 : Relation du gain de rendement net (%) des parcelles traitées et la différence de maladie par rapport au témoin pendant trois années 2000, 2001 et 2002 à Everlange. (A) ; en 2000 et 2001 à Reuland (B) et dans la Moselle (C). La figure D représente le gain de rendement net (kg/ha) en 2003 des différentes variantes testées dans les quatre sites. ....IV-11
- 1-4- 8 : Interaction entre la rouille brune et la septoriose des feuilles causée par *Septoria tritici* à Everlange en 2000.....IV-12
- 1-4- 9 : Evolution de la rouille brune et de la septoriose causée par *Septoria tritici* sur la F2 de Bussard à Everlange en 2000. En abscisse le stade phénologique selon ZADOKS *et al.* (1974). ....IV-13

## PHOTOS

- 1-4- 1 : Symptômes de la rouille brune en 2000 à Everlange et dans la Moselle luxembourgeoise. ....IV-5

## REFERENCES

- BETHENOD, O., L. HUBER & H. SLIMI (2001). "Photosynthetic response of wheat to stress induced by *Puccinia recondita* and post-infection drought." *Photosynthetica* **39**: 581-590.
- BURLEIGH, J. R., A. P. ROELFS & M. G. EVERSMEYER (1972). "Estimating Damage to wheat caused by *Puccinia recondita*." *Phytopathology* **62**: 944-946.
- CLIFFORD, B. C. & R. G. HARRIS (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.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., L. HUBER, M. LECONTE & H. GOYAU (1995). "Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration and infection of *P. recondita* f. sp. *tritici* and *P. striiformis* on wheat seedlings." *Phytopathology* **85**: (4) 409-415.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., J. ROUZET, M. LECONTE, M. DELORS & M. N. MISTON (2000). "La rouille jaune du blé en France. Des épidémies déclenchées par une nouvelle race, un hiver doux et un printemps humide." *Phytoma. La défense des végétaux* **527**: 22-29.
- EVERSMEYER, M. G. & C. L. KRAMER (1980). "Horizontal dispersion of urediniospores of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* and *P. graminis* f. sp. *tritici* from a source plot of wheat." *Ecology and epidemiology* **70**: non connues.
- EVERSMEYER, M. G., C. L. KRAMER & I. E. BROWDER (1980). "Effect of temperature and host : parasite combination on the latent period of *Puccinia recondita* in seedling wheat plants." *Phytopathology* **70**: 938-941.
- GREGORY, P. H. (1968). "Interpreting Plant Disease Dispersal gradients." *Ann. Rev. Phytopathol.* **6**: 181-212.
- HAU, B. & C. DE VALAVIEILLE-POPE (1998). Wind-dispersal diseases. In *The epidemiology of plant diseases*. E. D. G. J. K. A. Publishers. Dordrecht. Ed. pp. 323-347.
- JAMES, W. C. (1976). *Manual of plant growth stages and diseases assessment keys*. Ministry of Agriculture Fisheries. Food. (sans volume).
- KIYOSAWAS, S. & M. A. SHIYOMI (1972). "A theoretical evaluation of mixing resistant variety with susceptible variety for controlling plant diseases." *Ann. Phytopathol.* **38**: 361-368.
- MAC GRATH, M. T. & S. P. PENNYPACKER (1990). "Alteration of physiological processes in wheat flag leaves caused by stem rust and leaf rust." *Phytopathology* **80**: 677-686.

- MUNDT, C. C. & J. LEONARD (1985). "Techniques A Modification of Gregory's Model for Describing Plant Disease Gradients." *Phytopathology* **75**: 930-935.
- ROBERT, C. (2003). Etude et modélisation du fonctionnement d'un couvert de blé attaqué par le complexe parasitaire *Puccinia tritica* - *Mycosphaerella graminicola*. Thèse de doctorat. INRA, Paris-Grignon, 137 p.
- ROELFS, A. P. & L. B. MARTELL (1984). "Uredospore dispersal from a point source within a wheat canopy." *Phytopathology* **74**: 1262-1267.
- SACHE, I. (2000). "Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain." *Agronomie* **20**: 757-767.
- SACHE, I. (2002). L'épidémiologie végétale : un avenir incertain pour une discipline ancienne ? Diplôme d'habilitation à diriger les recherches. Université Paris-Sud, 44 p.
- SCHOLES, J. D. (1992). Photosynthesis : cellular and tissue aspects in diseased leaves. *In* Pests and pathogens - plant responses to foliar attack. E. Lancaster. P.G. Ayres. pp. 85-101.
- SCHOLES, J. D. & J. F. FARRAR (1986). "Increased rates of photosynthesis in localised regions of a barley leaf infected with brown rust." *New Pathologist* **104**: 601-612.
- SHANER, G. & R. E. FINNEY (1977). "The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in knox wheat." *Phytopathology* **67**: 1051-1056.
- SHTIENBERG, D. (1992). "Effects of foliar diseases on gas exchange processes : a comparative study." *Phytopathology* **82**: 760-765.
- SPITTERS, C. J. T., H. J. W. V. ROERMUND, H. G. M. G. NASSAU, J. SCHEPPERS & J. MESDAG (1990). "Genetic variation in partial resistance to leaf rust in winter wheat : disease progress, foliage senescence and yield reduction." *Neth. J. Pl. Path.* **50**: 179-195.
- TOMERLIN, J. R. & A. HOWELL (1988). "Distrain : a computer program for training people to estimate disease severity on cereal leaves." *Plant Dis.* **72**: 455-459.

---

## CHAPITRE V

### ÉPIDÉMIOLOGIE DE LA ROUILLE JAUNE AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

---

Au Grand-Duché de Luxembourg, la rouille jaune a connu une évolution très importante au sein des variétés susceptibles (Flair) entre 1999 et 2001.

Des foyers importants de la maladie ont été observés pendant ces trois années de mesure. Cependant, les plus importants foyers ont été observés en 2000 à Reuland et Everlange.

L'apparition de la maladie a été très précoce en 2000 (GS39) et tardive en 2001. Le positionnement du traitement pour cette maladie est une question très délicate. L'apparition précoce de la maladie en 2000 a nécessité un traitement précoce contre cette maladie. Le traitement réalisé au stade GS59 (Allegro 1 l/ha) n'a pas assuré une efficacité complète contre cette maladie. Cependant, en 2001, la maladie a été observée tardivement. Le traitement précoce réalisé au stade GS32 (Allegro 1 l/ha) n'était pas très efficace contre la rouille jaune. L'étude de linéarité du gain de rendement après contraction de la maladie et le niveau de maladie des trois dernières feuilles a révélé un coefficient de détermination de 0.9 ( $P < 0.05$ ) entre la maladie de F1 et le gain de rendement pendant la maturité laiteuse (GS70-GS75). Cependant, en 2001, cette corrélation a été très faible pour la F1 et la F2 et moyenne pour la F3 au stade maturité laiteuse (GS70-GS75).

---

#### I. Introduction

La rouille jaune du blé provoquée par *Puccinia striiformis* WESTENDORP peut causer une perte significative de rendement quand des méthodes de contrôle appropriées, à savoir la combinaison de variétés cultivées résistantes et des pulvérisations de fongicide, ne sont pas disponibles ou sont incorrectement appliqués (RAPILLY, 1979 ; AYLOR, 1990 ; MURRAY *et al.*, 1994 ; BAYLES *et al.*, 2000; SACHE, 2000). Des épidémies de rouille jaune du blé se sont développées au Grand-Duché de Luxembourg de 1999 à 2001, déclenchées très probablement par le contournement du gène de résistance Yr 17 en Europe du Nord (BAYLES *et al.*, 2000 ; HOVMOLLER, 2001 ; HOVMOLLER *et al.*, 2002). La virulence vis-à-vis de Yr 17 a été détectée dès 1994 en Angleterre et au Danemark où la superficie des terres emblavées par des variétés portant le gène Yr 17 et sensibles à la rouille jaune a augmenté de 1994 à 1997. La virulence vis-à-vis de Yr17 a été détectée en France et en Allemagne en 1997 avec une fréquence de plus de 70 % en 1999, suggérant une migration des spores du parasite à partir de l'Angleterre ou du Danemark (BAYLES *et al.*, 2000). Le Grand-Duché de Luxembourg est un pays limitrophe de l'Allemagne et de la France, et la plupart des variétés du blé d'hiver sont importées de l'Allemagne, ce qui explique probablement l'évolution très remarquable de la rouille jaune enregistrée en 1999 , 2000 et 2001. Cependant, la présence de souches capables

de surmonter un gène de résistance ne justifie pas à elle seule le développement d'une épidémie de rouille jaune si elle n'est pas couplée à des conditions météorologiques spécifiques favorisant la multiplication de ce parasite (RAPILLY, 1991).

L'objectif de ce chapitre est de décrire l'épidémiologie de la rouille jaune au Grand-Duché du Luxembourg et son importance économique.

## II. Matériels et méthodes

La maladie a été suivie (cf. les chapitres I et II pour plus de détail sur la méthodologie) à partir de la montaison jusqu'à la récolte sur quatre variétés semées dans trois sites d'essai implantés au Grand-Duché de Luxembourg, selon un bloc comprenant chacun quatre répétitions de chaque variante testée (la méthodologie est détaillée dans les deux premiers chapitres de cette partie).

Le suivi de la rouille jaune dans les sites d'essai a été réalisé selon deux méthodes : a) quantitativement, par les échelles de sévérité de JAMES (1974) qui consistait à déterminer la surface foliaire couverte par la maladie; b) qualitativement, par le suivi des aires de répartition de la maladie qui consistait à suivre à partir de la première plante malade, le nombre de plantes malades, l'orientation de la parcelle et l'épaisseur occupée par les plantes malades ainsi que le nombre de foyers sur l'ensemble du bloc et leur évolution temporelle.

Afin de permettre une meilleure discrimination entre les étages foliaires et entre les différentes variantes, nous avons jugé préférable d'utiliser comme critère l'AUDPC (SHANER & FINNEY, 1977).

L'analyse des résultats concernera seulement les variétés qui ont été touchées et les années où la maladie a été enregistrée.

## III. Résultats

### III.1. Année 1998-1999

Les observations ont débuté tardivement à Everlange (16 juin 1999) mais la maladie était très présente pendant la maturité sur les trois dernières feuilles F3, F2 et F1 (figure 1-5-1). La différence variétale a été très perceptible et très hautement significative ( $P < 0.001$ ).

Pour les variétés sévèrement attaquées, la différence entre le témoin et le traitement est significative ( $P < 0.05$ ). Le traitement GS39 a eu la même efficacité qu'un double traitement réalisé respectivement aux stades GS32 et GS59 (figure 1-5-2). Le gain de rendement des parcelles traitées est très important par rapport aux parcelles témoins (figure 1-5-2). Une relation importante ( $r^2 = 0.92$ ) a été enregistrée entre le gain de rendement de Flair et le niveau de maladie enregistré sur la F1 pendant la maturité laiteuse.

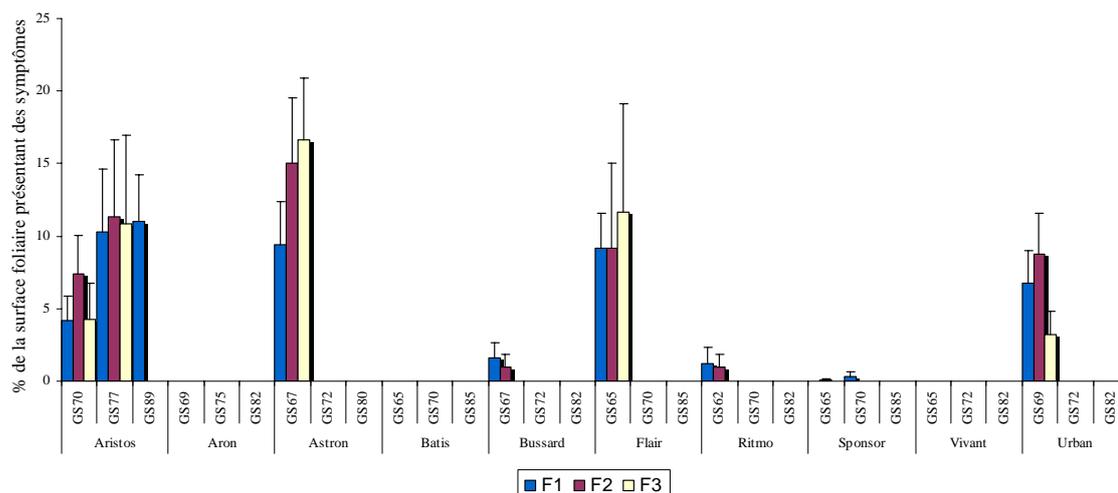


Figure 1-5-1 : Evaluation de la rouille jaune sur les trois étages foliaires supérieurs (F3, F2 et F1) en fonction de variétés pendant trois stades phénologiques (floraison, maturité laiteuse et maturité pâteuse) à Everlange en 1999.

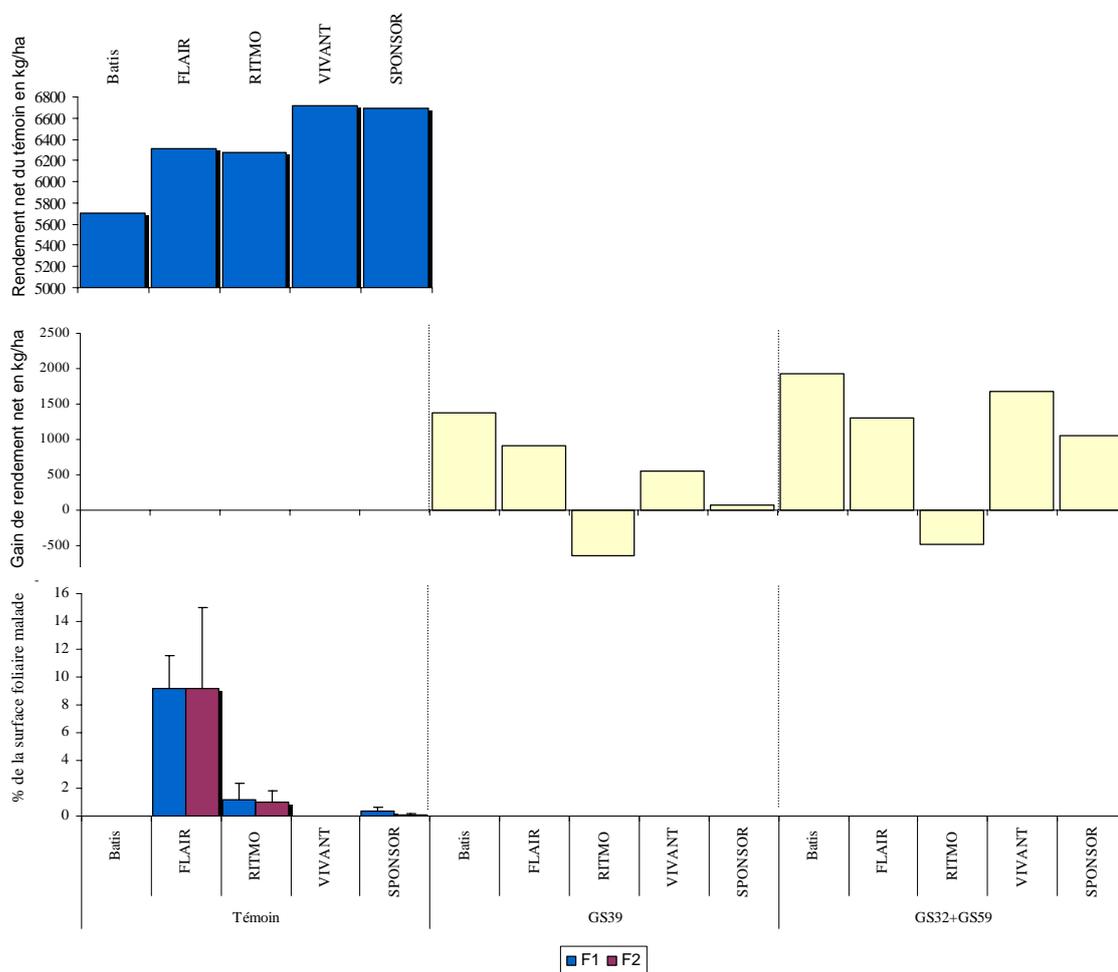
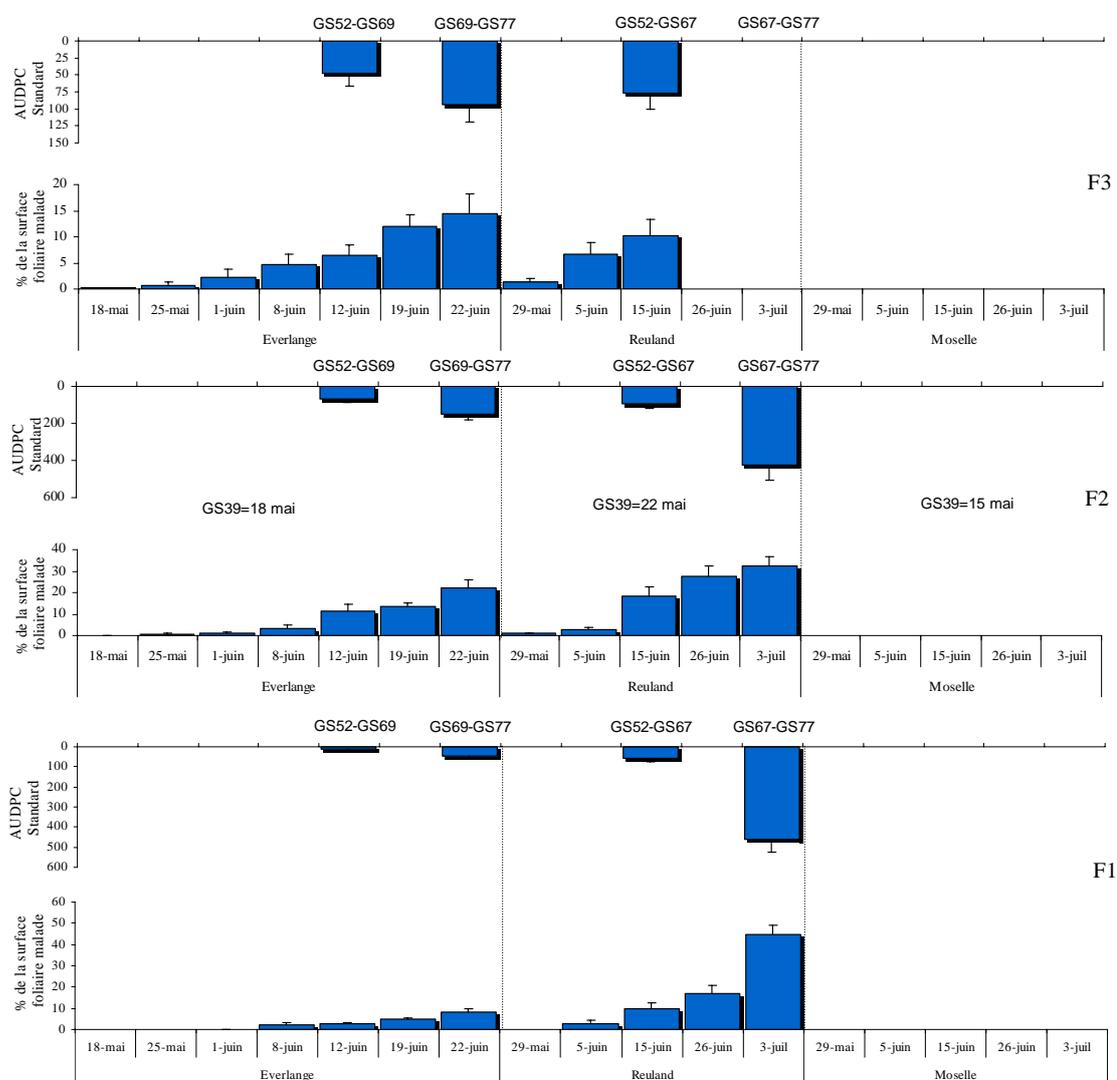


Figure 1-5-2 : Pourcentage de la surface foliaire malade pendant la maturité laiteuse (24 juin) et le gain de rendement en kg/ha par rapport au témoin du traitement réalisé au stade GS39 (Allegro 1 l/ha) et deux traitements réalisés respectivement au stade GS32 (Allegro 1 l/ha) et GS59 (Opus team 1.5 l/ha) à Everlange en 1999 en fonction de variétés. La figure du dessus représente le rendement du témoin pour chacune des variétés testées.

### III.2. Années 2000 et 2001

La rouille jaune a été observée et quantifiée à Everlange et Reuland en 2000 et 2001 (figures 1-5-3 et 1-5-4, photo 1-5-1). Cependant, dans la Moselle, la maladie a été observée uniquement en 2001. Le test d'ANOVA a révélé pour les trois sites d'essais un effet très hautement significatif ( $P < 0.001$ ) entre Flair et les trois autres variétés testées (Bussard, Dream et Ritmo). En effet, la maladie a été enregistrée uniquement sur Flair. Pour les autres variétés, la maladie était quasi absente (quelques traces sur Ritmo) pendant les deux saisons 2000 et 2001. Dans la suite du document, tous les résultats de la maladie en 2000 et 2001 concernent uniquement la variété Flair. En 2000, la maladie a été très précoce. La première trace de la maladie a été enregistrée à Everlange au stade GS33 et aux alentours du stade GS37 à Reuland. Une évolution spectaculaire de la maladie a été observée à partir de l'épiaison pour atteindre son maximum pendant la maturité laiteuse (entre GS69 et GS77). L'AUDPC Standard calculée pour les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) entre GS69 et GS77 est beaucoup plus importante que celle calculée entre GS52 et GS69.



**Figure 1-5-3 : Evaluation du pourcentage de la surface foliaire de la variété Flair présentant les symptômes de rouille jaune et l'AUDPC calculée entre deux stades différents de la culture pour les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) à Everlange, Reuland et la Moselle en 2000. N.B. : pour une question de précision, les échelles sont variables entre les trois feuilles (F1, F2 et F3).**

En 2001, l'évolution de la maladie était un peu tardive et le maximum a été enregistré à la fin de la maturité pâteuse pour Everlange et à la fin de la maturité laiteuse pour Reuland. L'AUDPC des trois dernières feuilles est plus importante entre GS77 et GS87 pour Everlange. Cependant, dans la Moselle, la maladie a été observée à une date plus précoce par rapport aux autres sites mais avec un niveau très faible.

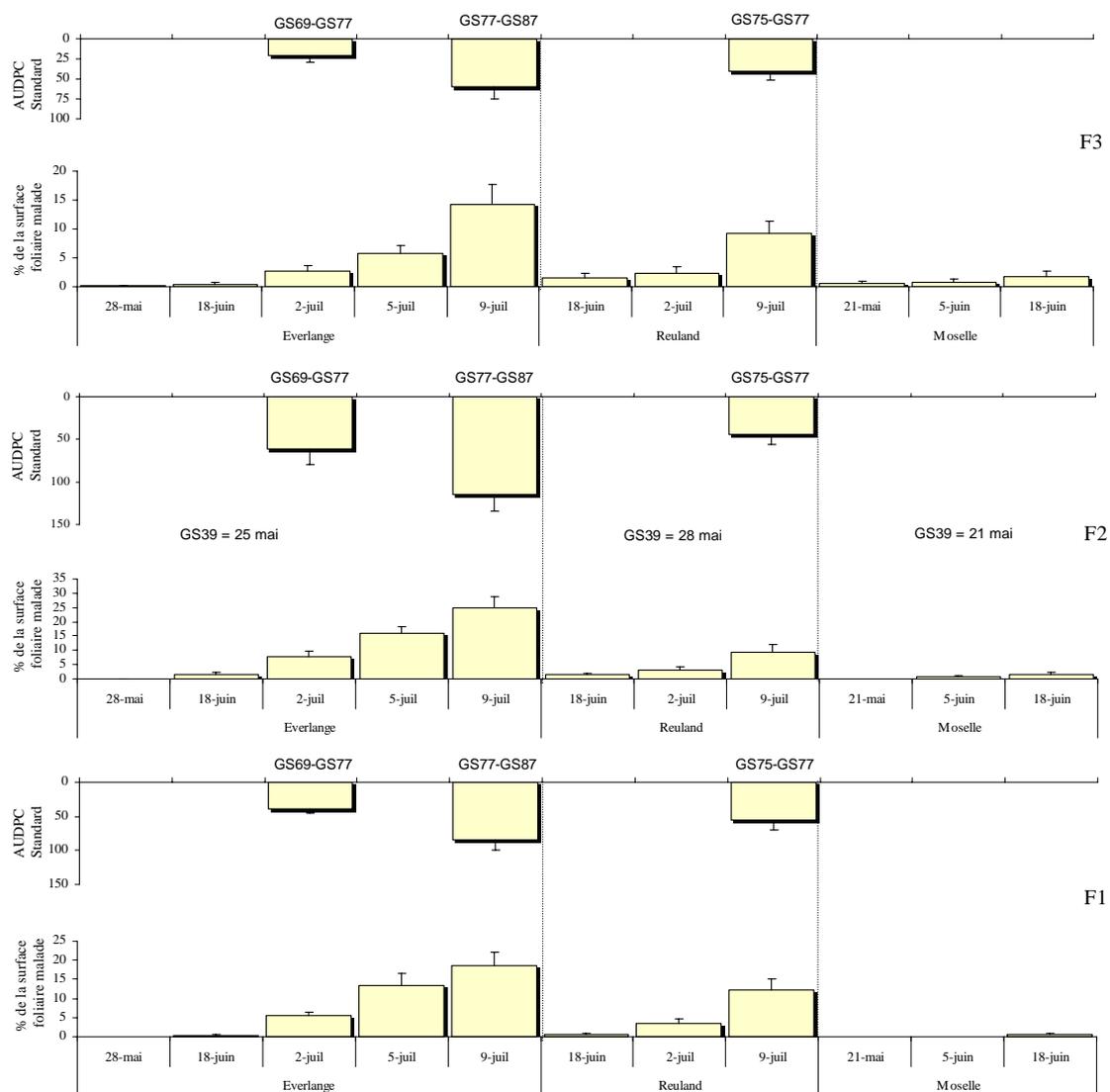
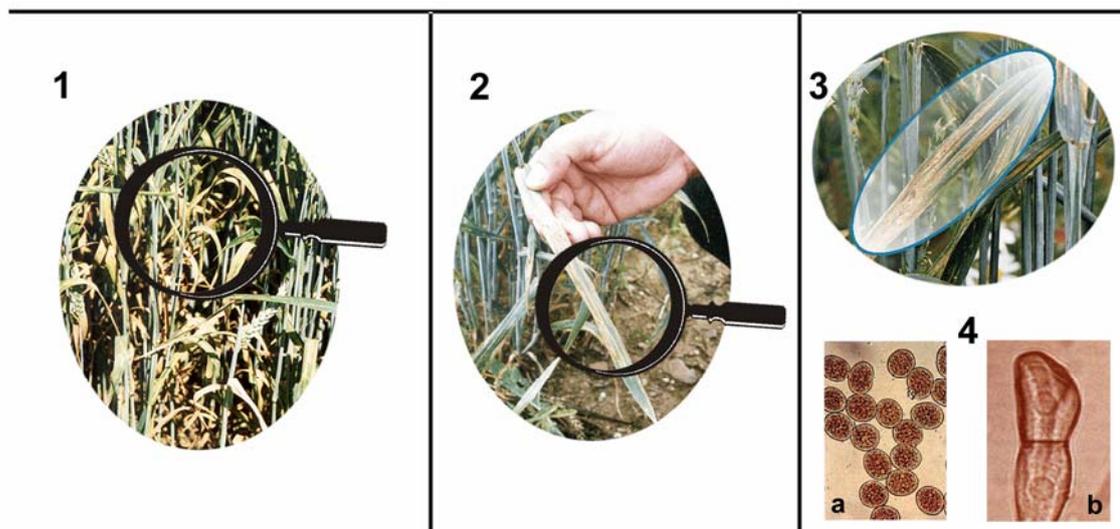


Figure 1-5-4 : Evaluation du pourcentage de la surface foliaire de la variété Flair présentant les symptômes de rouille jaune et l'AUDPC Standard calculée entre deux stades différents de la culture pour les dernières feuilles (F3, F2 et F1) à Everlange, Reuland et la Moselle en 2001.

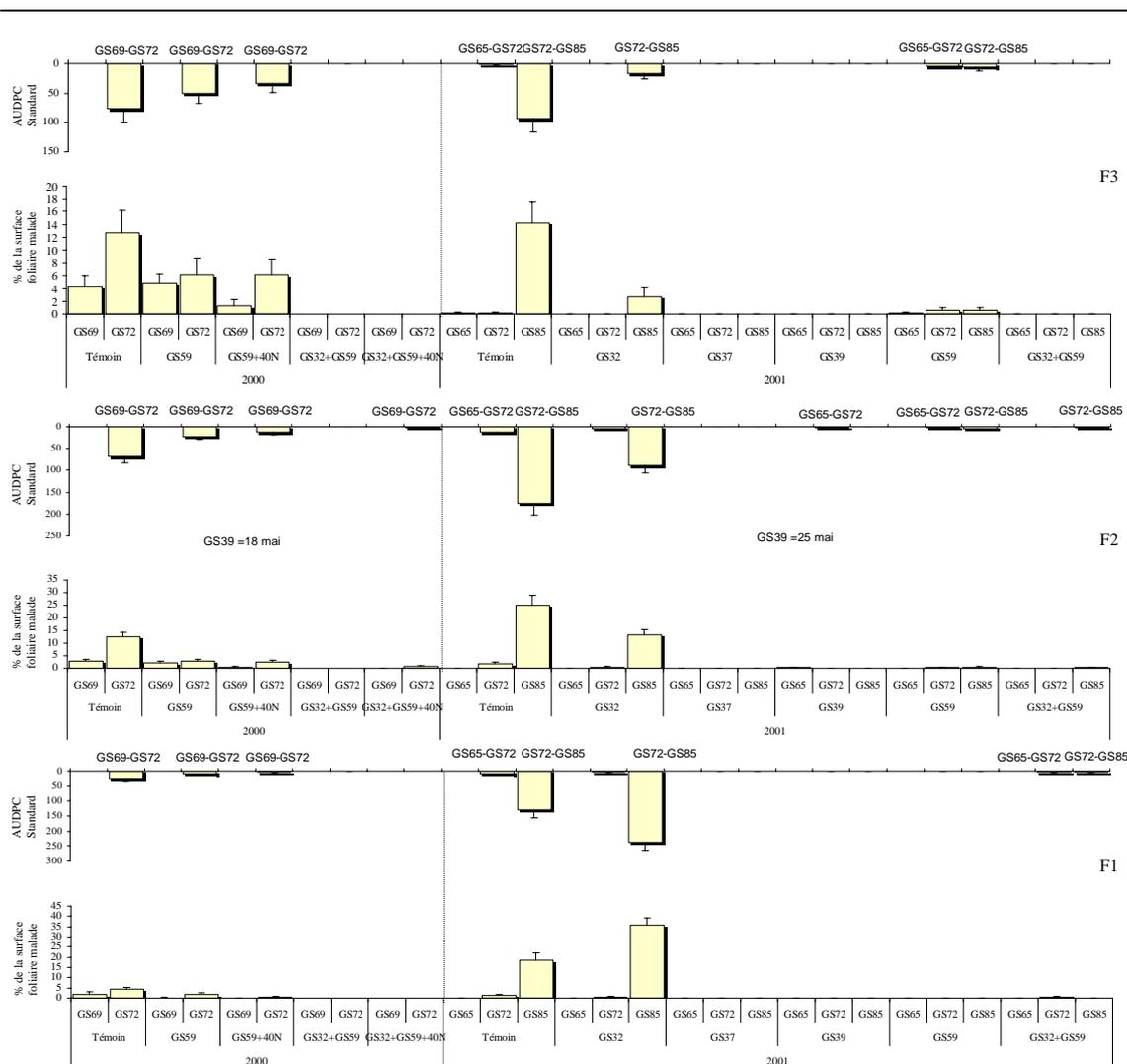


1 : Foyer de rouille jaune à Reuland (Photo prise le 19 juin 2000).  
 2 : Stries de rouille jaune sur une feuille de blé en 2001 à Everlange.  
 3 : Foyer de rouille jaune à Everlange (Photo prise le 10 juillet 2001).  
 4a : Télidiospores de *Puccinia striiformis* (ROELP et al., 1992).  
 4b : Urédiniospores de *Puccinia striiformis* (ROELP et al., 1992) .

Photo 1-5-1 : Symptômes de la rouille jaune causée par *Puccinia striiformis* en 2000 et 2001 à Everlange et Reuland. Sur la variété Flair.

### III.2.1. Effet du traitement

En 2000, la rouille jaune a été observée pendant l'émergence de la dernière feuille à Everlange et Reuland. Un traitement fongicide au moment de l'apparition des premières pustules assurerait une bonne protection des trois dernières feuilles. En effet, la comparaison de l'AUDPC des trois dernières feuilles calculée entre GS69 et GS72 à Everlange (figure 1-5-5) pour chaque traitement a révélé une différence significative ( $P < 0.05$ ) d'une part entre les traitements et le témoin et d'autre part entre le traitement GS59 et les deux traitements appliqués respectivement au stade GS32 et GS59 respectivement. En 2000, nous n'avons pas testé les traitements réalisés aux stades GS32, GS37 et GS39. Mais si le double traitement a eu une bonne efficacité par rapport au traitement GS59, ceci montre que c'est le premier traitement réalisé au stade GS32 avec Opus team (1.5 l/ha) qui a fait la différence par rapport au traitement GS59. A Reuland, seuls les deux traitements ont été comparés au témoin. La maladie a été quasi absente sur les parcelles traitées.



**Figure 1-5-5 : Variation de la rouille jaune en fonction des différentes variantes testées sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) de Flair à Everlange pendant les années 2000 et 2001. Deux types d'illustrations sont présentés pour chaque feuille et chaque traitement : a) la première (en-bas) représente le pourcentage de la surface foliaire présentant des symptômes pendant les stades de croissance où la maladie a été enregistrée ; b) le deuxième (au-dessus) représente l'AUDPC Standard calculé entre deux stades de croissances. Les fongicides testés sont : i) En 2000, Allegro (1 l/ha) pour le traitement GS59, pour le double traitement le premier traitement a été réalisé au stade GS32 par Opus team (1.5 l/ha) et au stade GS59, le produit utilisé est Allegro (1 l/ha).**

En 2001, tous les traitements réalisés à Everlange à partir du stade GS37 ont assuré une bonne protection des trois dernières feuilles (figure 1-5-5). Cependant, le traitement réalisé au stade GS32 a assuré la protection de la F3 mais sans aucune efficacité pour la F1. L'AUDPC de F1 du traitement GS32 est plus importante que celle du témoin. En 2001, l'apparition de la maladie était tardive par rapport à 2000 à Everlange comme à Reuland. Nous remarquons une grande différence de modalité de traitement entre l'année 2000 et 2001.

### III.2.2. Relation rendement maladie

En 2000, la corrélation entre le gain de rendement net en qx/ha et l'AUDPC relative calculée par rapport au témoin entre les stades GS55 et GS65 n'est pas très importante (figure 1-5-6). Cependant, cette corrélation est très importante entre l'AUDPC relative calculée entre les stades GS65 et GS75 et le gain de rendement net. Entre la floraison et la maturité laiteuse, la maladie a atteint son évolution maximale.

En 2001, la maladie était tardive et la corrélation entre le gain de rendement net et l'AUDPC relative calculée entre GS69 et GS75 est très faible pour la F1 et la F2 et moyenne pour la F3 entre la fin de la floraison et la maturité laiteuse. Cette corrélation est beaucoup plus faible entre l'AUDPC relative calculée entre GS75 et GS85 et le gain de rendement net (figure 1-5-6).

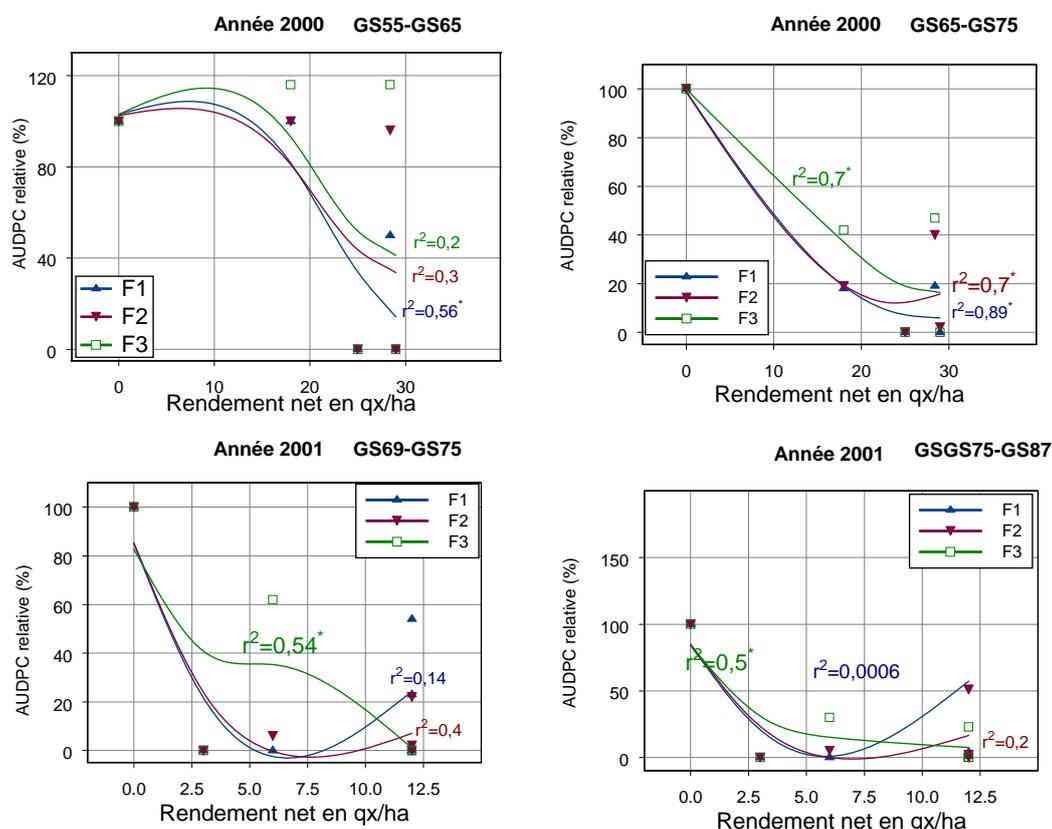


Figure 1-5-6 : Etude de la corrélation entre le gain de rendement net en qx/ha et de l'AUDPC relative de F1, F2 et F3 calculée par rapport au témoin en 2000 et 2001 à Everlange.

### III.2.3. Formation de foyers

Des foyers de la rouille jaune ont été mis en évidence à Everlange (figure 1-5-7) et à Reuland (1-5-8) en 2000 et 2001. Le détail de ces foyers sera développé dans la partie discussion.

## IV. Discussion

### IV.1. Année 1999

Les essais mis en place par le Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück ont permis de déceler l'importance du facteur variétal dans la lutte intégrée contre la rouille jaune. L'étude comparative a révélé un effet très hautement significatif ( $P < 0.001$ ). Les variétés les plus touchées sont Flair, Aristos, Astron et Urban. Les variétés Ritmo, Bussard, Batis, Aron, Sponsor et Vivant ont été très résistantes à la maladie (niveau de la maladie très négligeable à nulle). De plus, une grande hétérogénéité a été observée entre les extrémités d'un bloc avec une variété susceptible. Le degré de sévérité de la maladie diffère entre les extrémités du bloc. Il a été très important avec un foyer

nettement remarquable dans la direction Ouest-Est. A l’opposé, le degré de sévérité de la maladie a été très faible dans la direction Est-ouest du champ.

Cette hétérogénéité peut s’expliquer par le vent, qui est l’agent principal de dispersion de la rouille. Il a véhiculé les spores de cette maladie d’un foyer générateur qui se trouve dans un champ voisin ou à une distance plus ou moins importante et les conditions météorologiques<sup>1</sup> favorables de fin mai et une température fraîche (CARON, 1993) ont accéléré la formation de foyers.

## **IV.2. Année 2000 et 2001**

Les deux années 2000 et 2001 ont confirmé l’épidémie de la rouille jaune détectée en 1999. De plus, les modalités de traitement sont très différentes entre 2000 et 2001 à Everlange comme à Reuland (dans la Moselle, le niveau de maladie était très faible). La maladie est apparue à un stade très précoce de la croissance du blé en 2000. Les toutes premières pustules de la rouille jaune ont été observées à Everlange et Reuland le 15 mai (GS37) et au 18 mai (GS39), les pustules ont été observées sur la F3 et la F2. Des foyers étaient facilement détectables au début de juin sur les trois dernières feuilles de Flair à Everlange et Reuland. En 2000, un traitement avant le stade épiaison aurait assuré une bonne protection pendant la phase maturité. Cependant, en 2001, la maladie a été tardive. Les premières pustules de la rouille ont été détectées début juin à Everlange et la deuxième décade de juin à Reuland. Le développement de la maladie a été tardif en 2001 par rapport à 2000. Les premiers foyers ont été observables fin juin et début juillet. Les traitements précoces réalisés au stade GS32 n’ont pas assurés une bonne protection contre cette maladie. Les premières traces de la maladie ont été observées 24 jours après l’application du traitement GS32. Les traitements qui ont assuré une meilleure protection sont ceux appliqués à partir du stade GS37.

### **IV.2.1. Formation des foyers**

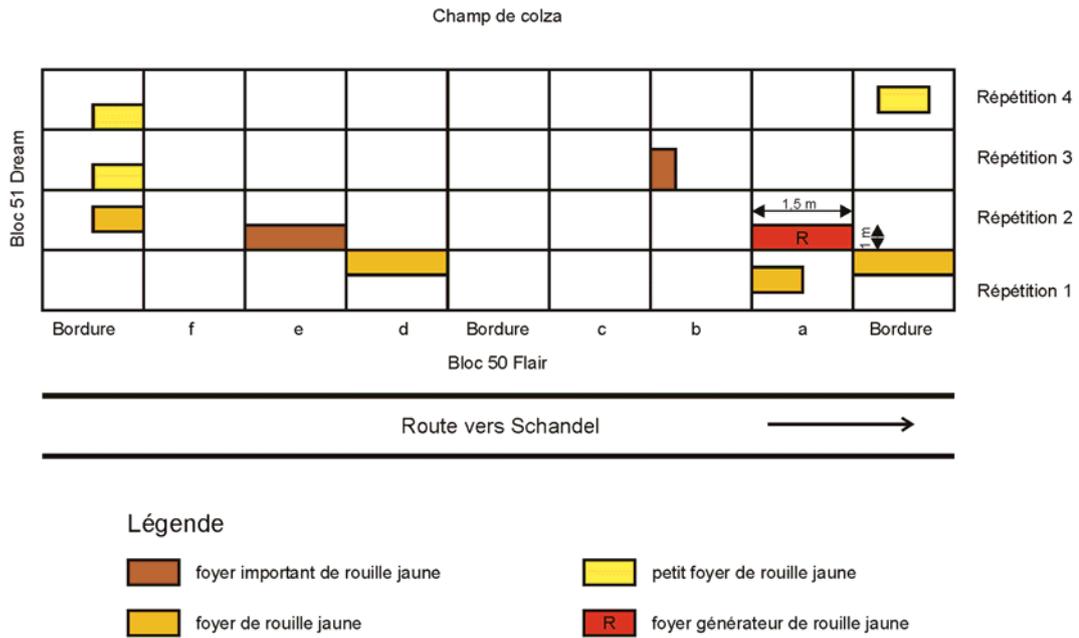
#### **Les foyers enregistrés en 2000 et 2001 à Everlange et Reuland**

En 2000, à Everlange, le premier foyer de la rouille jaune dans le champ de Flair consistait seulement en une plante infectée. La première plante de Flair présentant des symptômes sur les feuilles (F4, F3 et F2) a été détectée le 18 mai (GS39). Ce premier foyer a évolué en suivant une fonction ondulatoire avec une vitesse radiale constante d’une dizaine de centimètres par jour pour former des foyers secondaires (VAN DEN BOSCH *et al.*, 1988 ; SACHE, 1994). Ainsi, à l’épiaison, le premier foyer constitué de la première plante au centre entouré de quelques plantes voisines était déjà visible et les foyers secondaires étaient en formation. Ces foyers secondaires étaient facilement détectables le 19 juin 2000 au stade de maturité laiteuse (figure 1-5-7). Le nombre total de ces foyers à Everlange était de dix petits foyers visibles dont le plus important était celui de la répétition 2 qui a été le foyer générateur de la rouille jaune. Cependant, à Reuland, cette vague ondulatoire de déplacement du premier foyer a été déterminée en suivant la situation dans un champ de Flair voisin des parcelles d’essais. Les premières traces de la maladie ont été observées le 15 mai au sein d’une plante dans les bordures du champ de Flair voisin à une distance très proche des parcelles d’essais. Cette première plante a généré l’épidémie au sein des plantes qui l’entourent et celles voisine de cette plante. Parmi ces plantes voisines, celles appartenant à la variété Flair de nos essais. Nous avons suivi au fil du temps l’évolution des foyers qui étaient formé autour

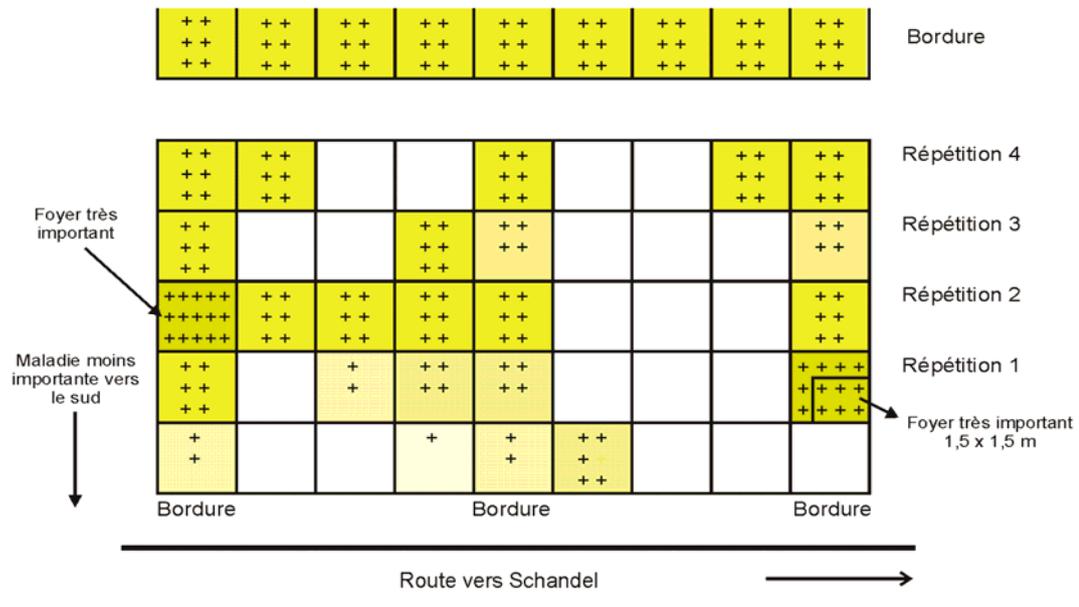
<sup>1</sup> L’explication concernant les conditions météorologiques favorables à la rouille jaune et à la formation de foyers de cette maladie sera développée en détail dans la deuxième partie

de la première plante atteinte ainsi que les foyers qui ont été générés à l'intérieur du champ et dans nos essais. Ainsi, un foyer de 3 m de longueur et 1.5 m de largeur autour de la première plante a été observé dans le champ de Flair le 19 juin. A cette date, des petits foyers ont été observés dans les parcelles d'essais et à proximité du premier foyer qui a été détecté mais aucun foyer n'a été signalé à l'intérieur du champ (figure 1-5-8). Entre le 19 juin et le 26 juin (GS75-GS77), nous avons observés l'apparition de plusieurs îlots de maladie à l'intérieur du champ Flair. Des zones de plus de 15 m de long ont été détectées. Ces foyers étaient très importants dans la descente, puis quasi nuls dans la vallée et enfin, ils apparaissaient de nouveau dans la montée.

### Everlange 2000 (19 juin)

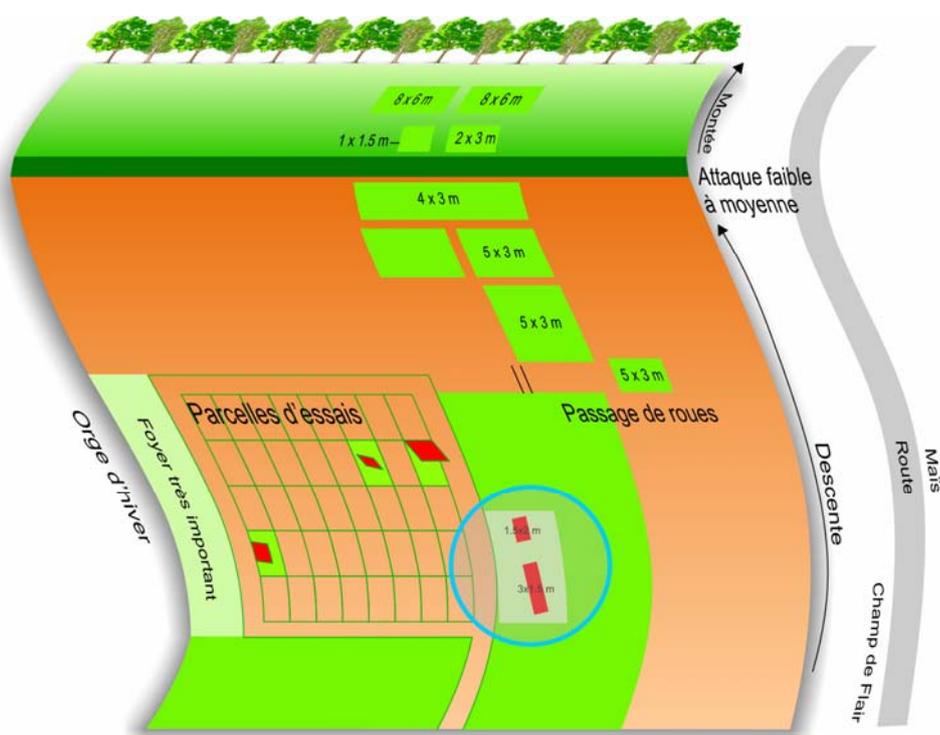


### Everlange 2001 (9 juillet)



**Figure 1-5-7 : Les foyers de la rouille jaune enregistrés en 2000 et 2001 à Everlange.**

L'analyse des données météorologiques pendant la formation des premiers foyers (fin mai) a révélé la présence d'un vent et d'une pluie favorables à une dissémination locale des spores (figure 1-5-9). Les spores de rouille jaune sont aérodynamiquement adaptées pour l'enlèvement par le vent, le déplacement et le transport (ORR *et al.*, 1972 *in* SACHE, 2000). La turbulence observable à petite échelle provoque un dépôt de spores à courte distance et de façon directionnelle. Ceci explique pourquoi les foyers primaires, d'un rayon de quelques mètres, sont souvent presque symétriques, même en présence de vent dominant. Des rafales et des tourbillons de vent apparaissent aléatoirement au sein du couvert végétal et « arrachent » quelques spores à la zone turbulente. Ces spores peuvent alors être incorporées aux flux soufflant au-dessus du couvert végétal et être entraînées à plus longue distance. La direction moyenne de ces flux de spores suit celle des vents dominants, ce qui n'exclut pas l'apparition de foyers contre le vent mais entraîne une dissémination préférentielle de la maladie selon le vent dominant (SACHE, 1994 et 2000). En 2001, à Everlange, la formation des foyers était plus tardive et de nombreux foyers ont été observés seulement le 9 juillet, ce qui correspond au stade GS87 (figure 1-5-7).



**LEGENDE :**

- Foyers observés le 19 juin
- Foyers très importants de rouille jaune (situation au 26 juin)
- Foyers importants de rouille jaune (situation au 26 juin)
- Attaque faible à très faible de la maladie (situation au 26 juin)
- Foyer générateur de la rouille jaune à Reuland

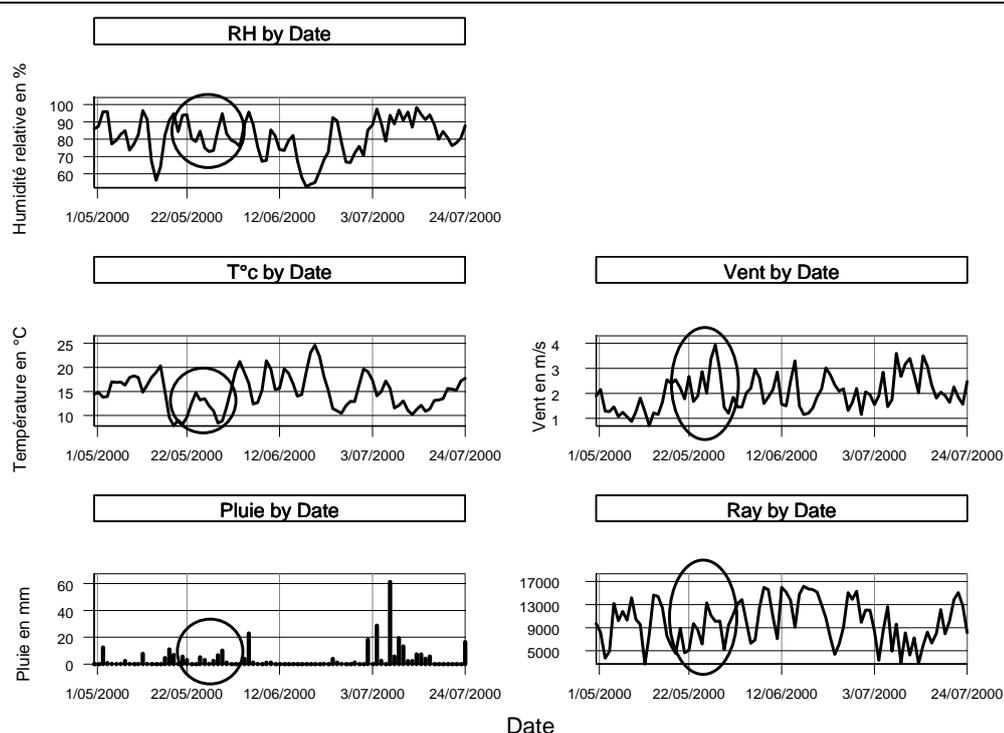
**Figure 1-5-8 : Evolution des foyers de la rouille jaune détectés à Reuland entre le 19 juin et le 26 juin 2000.**

## V. Conclusion

La rouille jaune a connu un développement remarquable en 2000 et son intensité diffère selon le site d'essai (très hautement significatif  $P < 0.001$ ). Ainsi, le site Reuland était le site le plus exposé et le plus attaqué par cette maladie. Cette importance de la rouille jaune pendant l'année 2000 et 2001 qui fait suite à celle de l'année 1999 confirme l'épidémie de cette maladie au Grand-Duché de Luxembourg.

Ce développement spectaculaire de la rouille jaune observé sur Flair dans les sites d'essais n'est pas due au contournement du gène de résistance Yr17 du faite que cette variété possède Yr1 mais ne possède pas le Yr17. En revanche, des études de la virulence de la rouille jaune ont été conduites tout au long de la période 1993-1999 au Danemark, en France, en Allemagne et au Royaume-Uni dont le but était d'étudier la structure de la race et l'évolution de la population de microbe pathogène (BAYLES *et al.*, 1995 et 1997 *in* BAYLES *et al.*, 2000).

Ce développement important de la rouille jaune au Grand-Duché de Luxembourg et dans les pays limitrophes (Belgique, Allemagne et la France) entre 1999 et 2001 souligne également l'importance de surveiller les populations de ces microbes pathogènes aéroportés sur une échelle internationale.



**Figure 1-5-9 :** Variation de température (°C), humidité relative (%), pluie (mm), vent (m/s) et rayonnement à Reuland du 1<sup>er</sup> mai au 24 juillet 2000. Le cercle indique la période où les conditions sont propices à la formation de foyers.

Au Grand-Duché de Luxembourg la majorité des variétés introduite au catalogue national provient soit de l'Allemagne, de la Belgique ou de la France. La présence d'une nouvelle virulence dans un de ces pays est susceptible d'être de près suivie de son apparition au Grand-Duché de Luxembourg. Pour les années à venir, nous plaidons donc en faveur d'une approche régionale dans la gestion de cette maladie à savoir : a) déterminer les facteurs qui influencent les épidémies détectées dans chacun de ces pays ; b) établir le risque d'une épidémie de la rouille jaune à l'ensemble de la région lorsque celle-ci est détectée dans un de ces pays limitrophes ; c) coordonner les

recherches sur les souches de cette maladie entre ces pays limitrophes ; d) installer des capteurs de spores et les distances que peuvent parcourir lorsqu'une épidémie est déclarée dans l'un de ces pays.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## FIGURES

- 1-5-1 : Evaluation de la rouille jaune sur les trois étages foliaires supérieurs (F3, F2 et F1) en fonction de variétés pendant trois stades phénologiques (floraison, maturité laiteuse et maturité pâteuse) à Everlange en 1999..... V-3
- 1-5-2 : Pourcentage de la surface foliaire malade pendant la maturité laiteuse (24 juin) et le gain de rendement en kg/ha par rapport au témoin du traitement réalisé au stade GS39 (Allegro 1 l/ha) et deux traitements réalisés respectivement au stade GS32 (Allegro 1 l/ha) et GS59 (Opus team 1.5 l/ha) à Everlange en 1999 en fonction de variétés. La figure du dessus représente le rendement du témoin pour chacune des variétés testées. .... V-3
- 1-5-3 : Evaluation du pourcentage de la surface foliaire de la variété Flair présentant les symptômes de rouille jaune et l'AUDPC calculée entre deux stades différents de la culture pour les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) à Everlange, Reuland et la Moselle en 2000. N.B. : pour une question de précision, les échelles sont variables entre les trois feuilles (F1, F2 et F3)..... V-4
- 1-5-4 : Evaluation du pourcentage de la surface foliaire de la variété Flair présentant les symptômes de rouille jaune et l'AUDPC Standard calculée entre deux stades différents de la culture pour les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) à Everlange, Reuland et la Moselle en 2001. .... V-5
- 1-5-5 : Variation de la rouille jaune en fonction des différentes variantes testées sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) de Flair à Everlange pendant les années 2000 et 2001. Deux types d'illustrations sont présentés pour chaque feuille et chaque traitement : a) la première (en-bas) représente le pourcentage de la surface foliaire présentant des symptômes pendant les stades de croissance où la maladie a été enregistrée ; b) le deuxième (au-dessus) représente l'AUDPC Standard calculé entre deux stades de croissances. Les fongicides testés sont : i) En 2000, Allegro (1 l/ha) pour le traitement GS59, pour le double traitement le premier traitement a été réalisé au stade GS32 par Opus team (1.5 l/ha) et au stade GS59, le produit utilisé est Allegro (1 l/ha)..... V-7
- 1-5-6 : Etude de la corrélation entre le gain de rendement net en qx/ha et de l'AUDPC relative de F1, F2 et F3 calculée par rapport au témoin en 2000 et 2001 à Everlange. .... V-8
- 1-5-7 : Les foyers de la rouille jaune enregistrés en 2000 et 2001 à Everlange. .... V-11
- 1-5-8 : Evolution des foyers de la rouille jaune détectés à Reuland entre le 19 juin et le 26 juin 2000..... V-11
- 1-5-9 : Variation de température (°C), humidité relative (%), pluie (mm), vent (m/s) et rayonnement à Reuland du 1<sup>er</sup> mai au 24 juillet 2000. Le cercle indique la période où les conditions sont propices à la formation de foyers. .... V-12

## PHOTOS

- 1-5-1 : Symptômes de la rouille jaune causée par *Puccinia striiformis* en 2000 et 2001 à Everlange et Reuland. Sur la variété Flair. .... V-6

## REFERENCES

- AYLOR, D. E. (1990). "The role of Intermittent wind in the dispersal of Fungal Pathogens." *Ann. Rev. Phytopathol.* **28**: 73-92.
- BAYLES, R. A., K. FLATH, M. S. HOVMOLLER & C. DE VALAVIEILLE-POPE (2000). "Breakdown of the Yr17 resistance to yellow rust of wheat in Northern Europe." *Agronomie* **20**: 805-811.
- CARON, D. (1993). *Maladies des blés et des orges*. Paris. ITCF Institut Technique des Céréales et des Fourrages. ISBN 2.86492.156.1. 87 p.
- HOVMOLLER, M. S. (2001). "Disease severity and pathotype dynamics of *Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* in Denmark." *Plant Pathology* **50**: 181-189.
- HOVMOLLER, M. S., A. F. JUSTESEN & J. K. M. BROWN (2002). "Clonality and long-distance migration of *Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* in north-west Europe." *Plant Pathology* **51**: 24-32.
- JAMES, W. C. (1974). "Assessment of plant diseases and losses." *Ann.Rev.Phytopathol.* **12**: 27-48.
- MURRAY, G. M., P. J. ELLISON, A. WATSON & B. R. CULLIS (1994). "The relationship between wheat yield and stripe rust as affected by length of epidemic and temperature at the grain development stage of crop growth." *Plant Pathology* **43**: 397-405.
- RAPILLY, F. (1979). "Yellow Rust Epidemiology." *Ann. Rev. Phytopathol.* **17**: 59-73.
- RAPILLY, F. (1991). Epidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. *Epidémiologie en pathologie végétale*. L. T. Doc. Paris. Institut National de la Recherche Agronomique INRA. ISBN 2-7380-0297-8. 317 p. pp. 240-261.
- SACHE, I. (1994). "La dissémination éolienne des maladies cryptogamiques." *Phytoma. La défense des végétaux* **467**: 20-25.
- SACHE, I. (2000). "Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain." *Agronomie* **20**: 757-767.
- SHANER, G. & R. E. FINNEY (1977). "The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in knox wheat." *Phytopathology* **67**: 1051-1056.
- VAN DEN BOSCH, F., J. C. ZADOCKS & J. A. METZ (1988). "Focus expansion in plant disease. The constant rate of focus expansion." *Phytopathology* **78**: (1) 54-58.

---

## CHAPITRE VI

### EPIDÉMIOLOGIE DE L'HELMINTHOSPORIOSE AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

---

---

L'helminthosporiose des feuilles du blé d'hiver a connu un développement très important dans les variétés susceptibles en 1999 et 2000 à Everlange. L'interaction de ces variétés avec un semis sans labour et des conditions météorologiques favorables a été à l'origine de l'expansion très précoce de la maladie en 2000 dans ce site. L'étude de la corrélation entre l'AUDPC Standard calculée pour la F1 et la F2 entre GS71 et GS77 et le gain de rendement (qx/ha) a révélé une relation négative ( $r = -0.92$  ;  $P < 0.001$  pour F1 et  $r = -0.79$  ;  $P < 0.05$  pour F2). Les conditions météorologiques qui étaient à l'origine de la maladie sont : a) une humidité relative  $> 70$  % pendant au moins 24 h avec au moins 6 h où elle est supérieure à 90 % ; b) un optimum de température entre 8 et 16°C ; c) la présence de la pluie pendant au moins une heure au début de la période.

---

#### I. Introduction

L'helminthosporiose des feuilles de blé causé par *Pyrenophora tritici-repentis* (anamorphe *Drechslera tritici-repentis* SHOEMAKER) pourrait être à l'origine des pertes considérables du rendement (pourrait atteindre 20 % lorsque la variété est susceptible et les conditions d'infections sont favorables) dans les régions céréalières lorsque les conditions épidémiologiques du parasite lui sont favorables (WATKINS *et al.*, 1978 ; HOSFORD, 1982 ; REES & PLATZ, 1983 ; FERNANDEZ *et al.*, 2002). Le champignon produit deux types de symptômes distincts chez les variétés susceptibles : les nécroses et les chloroses (ALI *et al.*, 1999). Le cycle primaire de la maladie est initié par les ascospores et les conidiophores issus des résidus de la culture précédente (ADEE & PFENDER, 1989). Le cycle secondaire est déclenché par les conidies issues des lésions primaires. Ce cycle se répète en fonction des conditions épidémiologiques favorables jusqu'à la maturité de l'hôte (WRIGHT & SUTTON, 1990). L'humidité et la température sont les premiers facteurs déterminant l'infection de l'helminthosporiose. Pour les variétés susceptibles, la période humide minimale nécessaire pour l'infection des feuilles par les conidies est de 6 h (HOSFORD *et al.*, 1990). La sévérité de la maladie augmente avec la durée de la période humide pour les variétés susceptibles (LAMARI *et al.*, 1992). Les températures autour de 20 °C et une période humide de 24 h sont les conditions appropriées pour une infection régulière (LAMARI *et al.*, 1992). En plus de ces conditions, la présence de l'eau liquide est indispensable à l'infection (FRANCL, 1997).

L'objectif de ce chapitre est d'analyser l'importance de cette maladie au Grand-Duché de Luxembourg et de comprendre les mécanismes de son évolution au sein de ce pays.

## II. Matériels et méthodes

### II.1. Mesure de la maladie

Les mesures (la méthodologie de mesure est développée en détail dans le chapitre II de cette partie) de la maladie sur chacune des feuilles ont été quantifiées selon les échelles de sévérité de JAMES (1976) et qualifiées à l'échelle des parcelles pour la localisation des aires de dispersion de la maladie. Nous avons calculé l'AUDPC (calculée en fonction du pourcentage enregistré sur chacune des feuilles et la durée séparant deux mesures) des trois dernières feuilles de chacune des variantes testées et nous l'avons utilisé comme critère de discrimination entre chacune de ces variantes. En plus de la quantification de la maladie, des mesures de hauteur de la plante jusqu'à la base de l'épi ont été faites pour analyser leur corrélation avec l'évolution de la maladie.

### II.2. Caractérisation de souches

Les échantillons isolés ont été identifiés au laboratoire à l'aide d'un stéréo microscope et d'un microscope optique (Gx40). En parallèle à cette identification, des échantillons de feuilles de parcelles traitées et témoins à Everlange ont été envoyés à l'Unité de Phytopathologie de l'UCL pour caractériser le type de souche.

Les souches issues de ces échantillons ont été poussées sur milieu V8-PDA pendant une semaine. Le mycélium de la souche issue des feuilles traitées a été aplati avec le bas d'un tube à essai pour induire la formation de conidiophores (lumière continue pendant 24 h) et la formation de conidies (18-24 h sous obscurité). Les photos des conidies ont été prises avec différents oculaires x objectifs et en utilisant également le zoom de la caméra digitale montée sur le microscope.

### II.3. Relation plante champignon climat

Afin de comprendre les paramètres qui influencent l'évolution de la maladie, nous avons étudié la corrélation entre l'évolution de la maladie et le nombre de périodes d'infections. Nous nous sommes basés sur les résultats de la littérature (LAMARI *et al.*, 1992 ; FRANCL, 1997) pour déterminer les conditions météorologiques propices à l'helminthosporiose. Notre étude s'étale entre l'émergence de la dernière feuille (GS37) (8 mai) et la fin de la maturité (15 juillet) en 2000 et 2001. Ainsi, nous avons testés l'interaction de trois paramètres météorologiques : a) une humidité relative > 70 % pendant au moins 24 h avec au moins 6 h où elle est supérieure à 90 % [pendant les premières 24h, 70 % est au plus pendant une heure pour éviter les précisions liées à l'interruption des périodes d'infection (HOSFORD *et al.*, 1990 ; LAMARI *et al.*, 1992)] ; b) un optimum de température entre 8 et 16°C (FRANCL, 1997) ; c) la présence de la pluie pour au moins une heure au début de la période (FRANCL, 1997).

Les analyses statistiques de variances et de corrélations ont été réalisées via le logiciel SAS (Procédure PROC GLM et PROC ANOVA et PROC CORR) et S-Plus 2000.

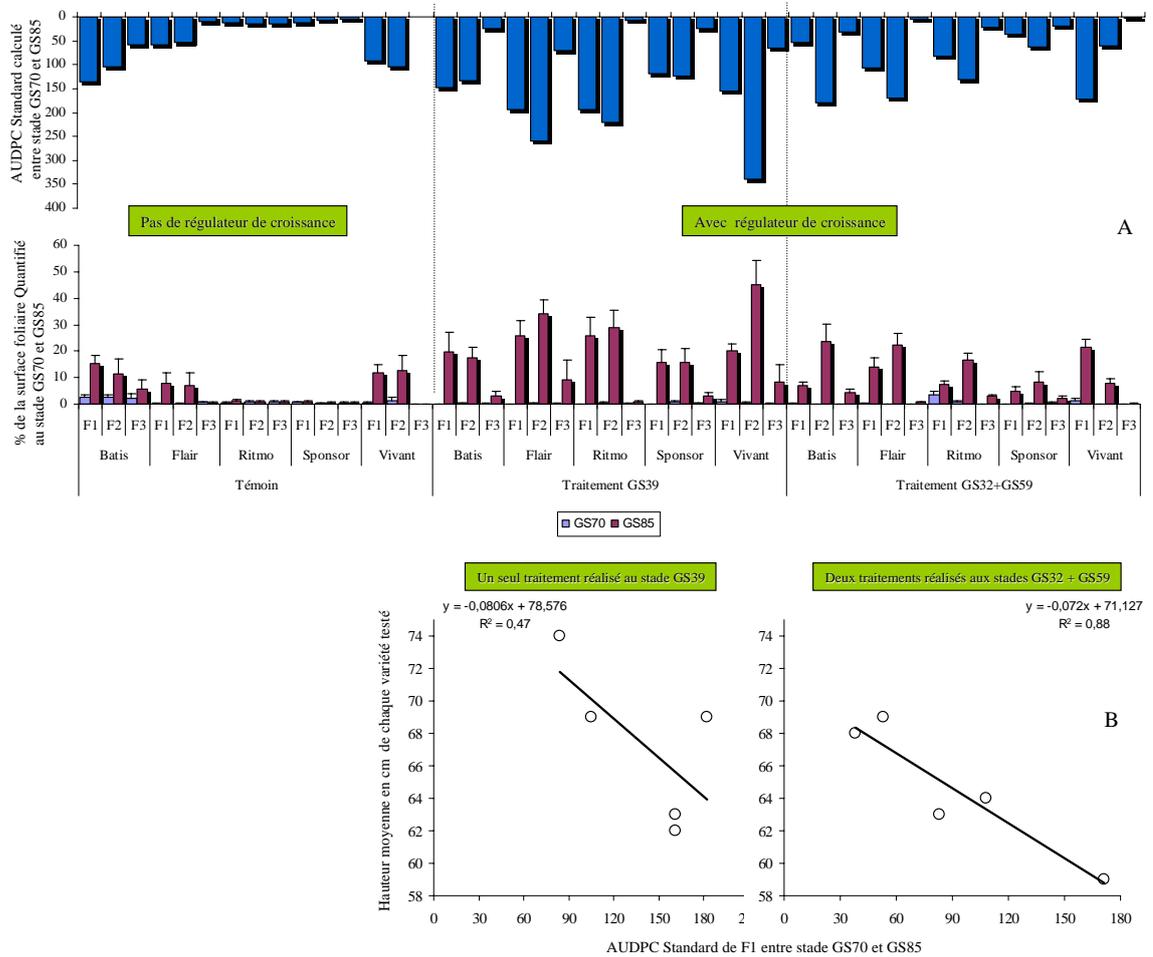
## III. Résultats

### Pendant la saison 1998-1999

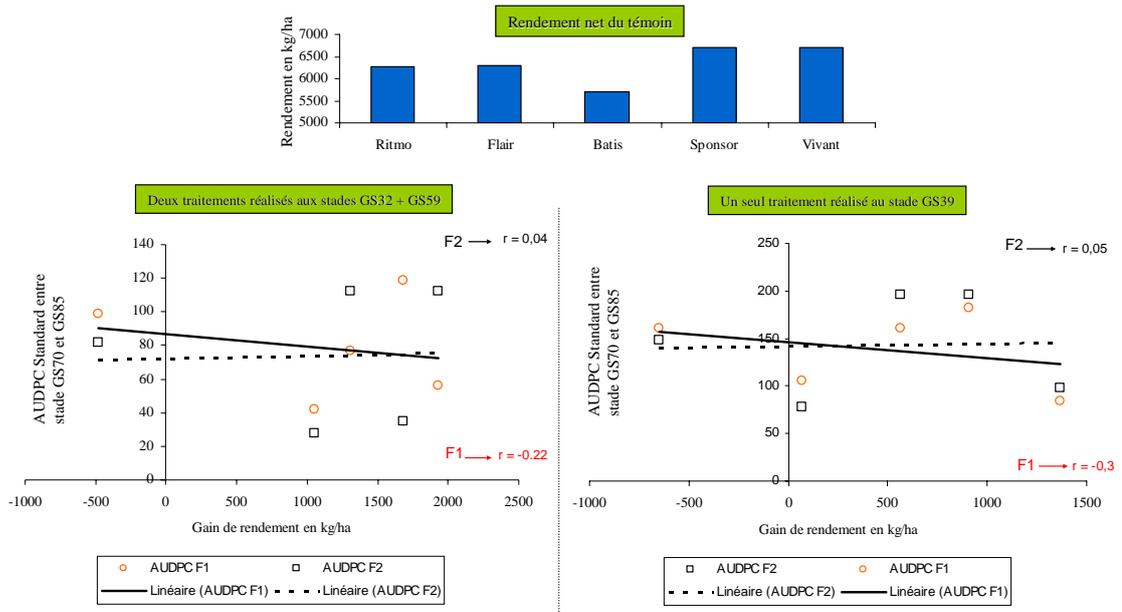
La maladie a été enregistrée en fin de saison avec des amplitudes variables en fonction de variétés ( $P < 0.001$ ) (figure 1-6-1 A). La maladie a été très importante sur les feuilles traitées (GS39 et GS32+GS59) par rapport au témoin ( $P < 0.001$ ). L'étude de la corrélation entre l'AUDPC calculée pour les feuilles traitées (toutes les parcelles traitées avec un ou deux traitements fongicides ont reçu un régulateur de croissance) et la

hauteur de chacune des variétés (figure 1-6-1 B), montre une corrélation négative importante entre la hauteur de la plante en cm et le traitement GS32+GS59 ( $r = -0.96$ ,  $r^2 = 0.9$ ,  $P < 0.001$ ), ainsi que le traitement GS39 ( $r = -0.68$ ,  $r^2 = 0.5$ ,  $P < 0.001$ ).

L'étude de la relation du gain de rendement des deux moments de traitements et l'AUDPC des deux dernières feuilles (figure 1-6-2) montre une faible corrélation négative avec la feuille F1 et une corrélation très négligeable avec la feuille F2.



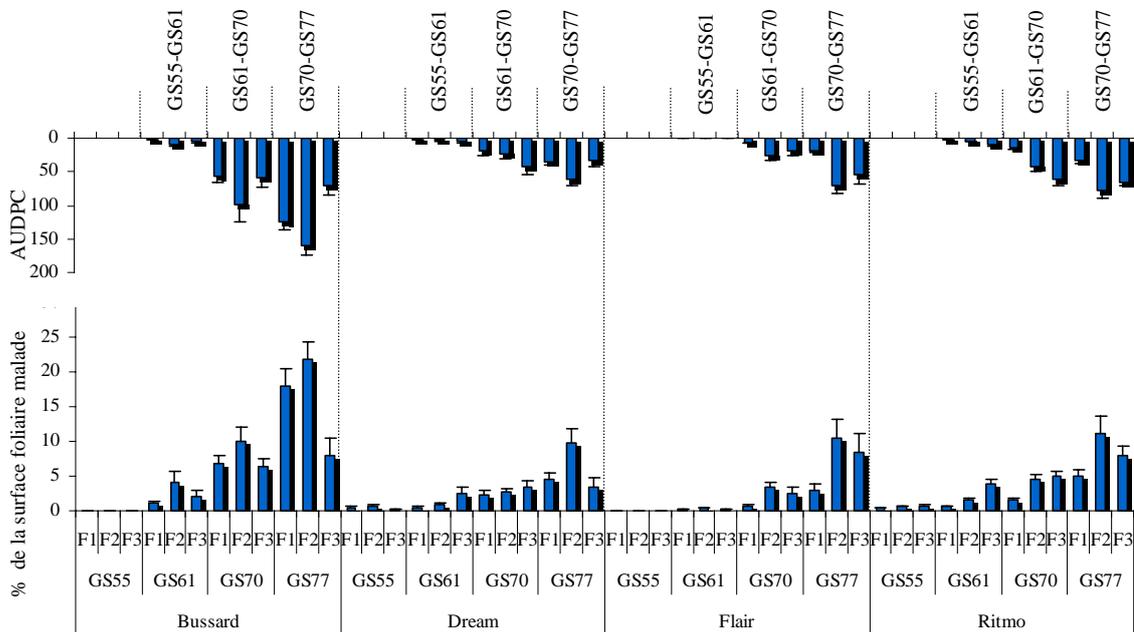
**Figure 1-6- 1 :** A) Variation de la surface foliaire présentant des symptômes au stade GS70 et GS85 sur les trois dernières feuilles (F1, F2 et F3) des variétés testées ainsi que l'AUDPC standard calculée entre le stade GS70 et GS85 pour trois variantes testées à Everlange en 1999. B) Analyse de la corrélation entre la hauteur en cm de chaque variété testée avec un régulateur de croissance et l'AUDPC Standard de F1 calculée entre stade GS70 et GS85 pour deux variantes (1 seul traitement et deux traitements)



**Figure 1-6- 2 : Etude de la corrélation de l'AUDPC de la F1 et la F2 entre GS70 et GS85 des trois variantes testées et le gain de rendement en Kg/ha en fonction de variétés en 1999. Le rendement net est le rendement brut ramené à 15% d'humidité (le blé d'hiver est commercialisé à 15% au Grand-Duché de Luxembourg).**

Pendant la saison 1999-2000

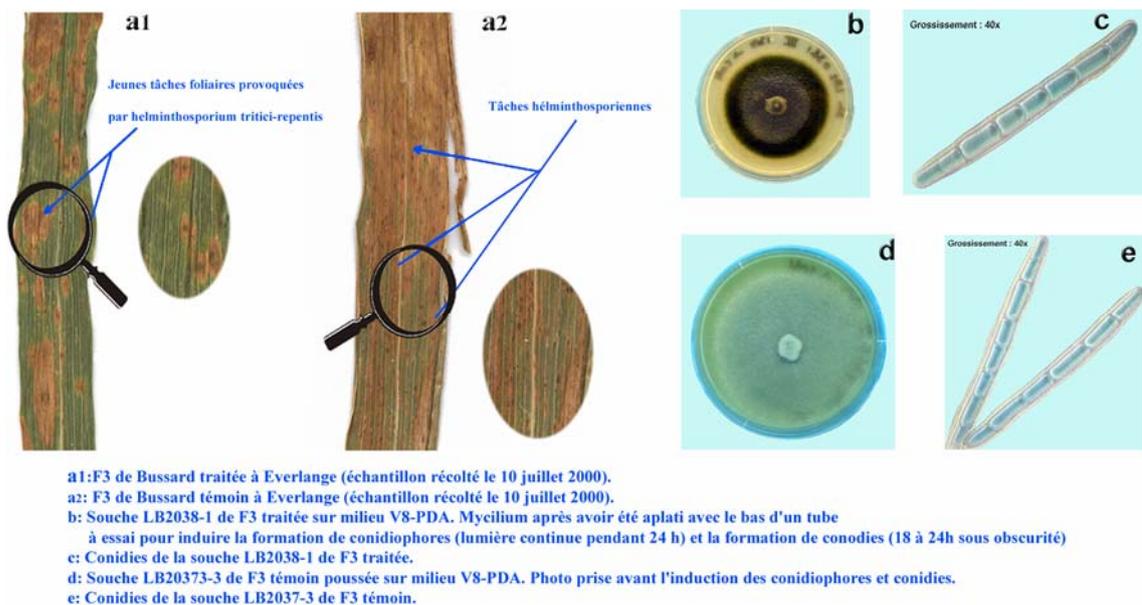
La maladie a été enregistrée sur toutes les variétés semées pendant cette année (Bussard, Dream, Flair et Ritmo) à partir de l'épiaison (figure 1-6-3).



**Figure 1-6- 3 : Variation du pourcentage de la surface foliaire malade au sein de trois dernières feuilles des variétés testées en 2000 à Everlange ainsi que la variation de l'AUDPC entre GS55 et GS61 ; GS61 et GS70 ; GS70 et GS77.**

L'évolution de la maladie était très remarquable pendant la maturité (GS77). Le pourcentage de maladie enregistré à ce stade sur les trois dernières feuilles de Bussard diffère significativement des autres variétés testées. Les effets du double traitement (GS32+GS59) et du traitement réalisé au stade GS59 étaient très visible au stade GS77

sur la F1 des différentes variétés testées (figure 1-6-4 A), mais ces traitements n'ont montré aucun effet quarante jours (GS89) après la dernière application (figure 1-6-4 B). En effet, la valeur de l'AUDPC calculée entre la fin de maturité laiteuse (GS77) et la fin de la maturité pâteuse (GS89) a été plus grande et très hautement significative par rapport à celle calculée pendant le début et la fin de la maturité laiteuse (entre GS71 et GS77) pour toutes les variétés testées (figure 1-6-4 B). La gamme de produits fongicide qui ont été utilisés dans nos essais a assuré une certaine protection contre cette maladie puisqu'au stade GS77 la différence est nette entre les parcelles témoins et celles traitées. Cependant, ces produits n'ont pas permis de stopper les infections tardives de ce champignon. Notre principale question déduite de cette évolution très importante de la maladie à la fin de la saison sur les feuilles témoins et celles traitées est la suivante : est-ce la gamme du produit utilisé qui n'est pas très efficace contre cette maladie ? Est-ce une nouvelle souche qui s'est développée et qui cause des problèmes même aux parcelles traitées ? Les résultats de l'identification des souches font ressortir deux types de souches : a) une souche identifiée « LB2038-1 » (Souche LB2038-1 prélevée le 15 juin 2000 à Everlange sur la feuille F2 de Bussard traitée avec Allegro + 50 N au stade GS59) sur la feuille traitée (photo 1-6-1) et b) une souche « LB2037-3 » (Souche LB2037-3 collectée le 15 juin 2000 à Everlange sur F2 de Bussard témoin) des feuilles témoins. La largeur et la longueur des conidies varient entre 11-13  $\mu\text{m}$  et 160-185  $\mu\text{m}$  respectivement.



**Photo 1-6- 1 : Tâches helminthosporiennes bien nettes sur les deux feuilles traitées et témoin et l'identification des deux souches. La photo d a été prise avant l'induction des conidiophores et conidies. Echantillons récoltés par El JARROUDI, M. (Université de Liège). Photos microscopiques prises par MERCADO VERGNES (FYMY, UCL).**

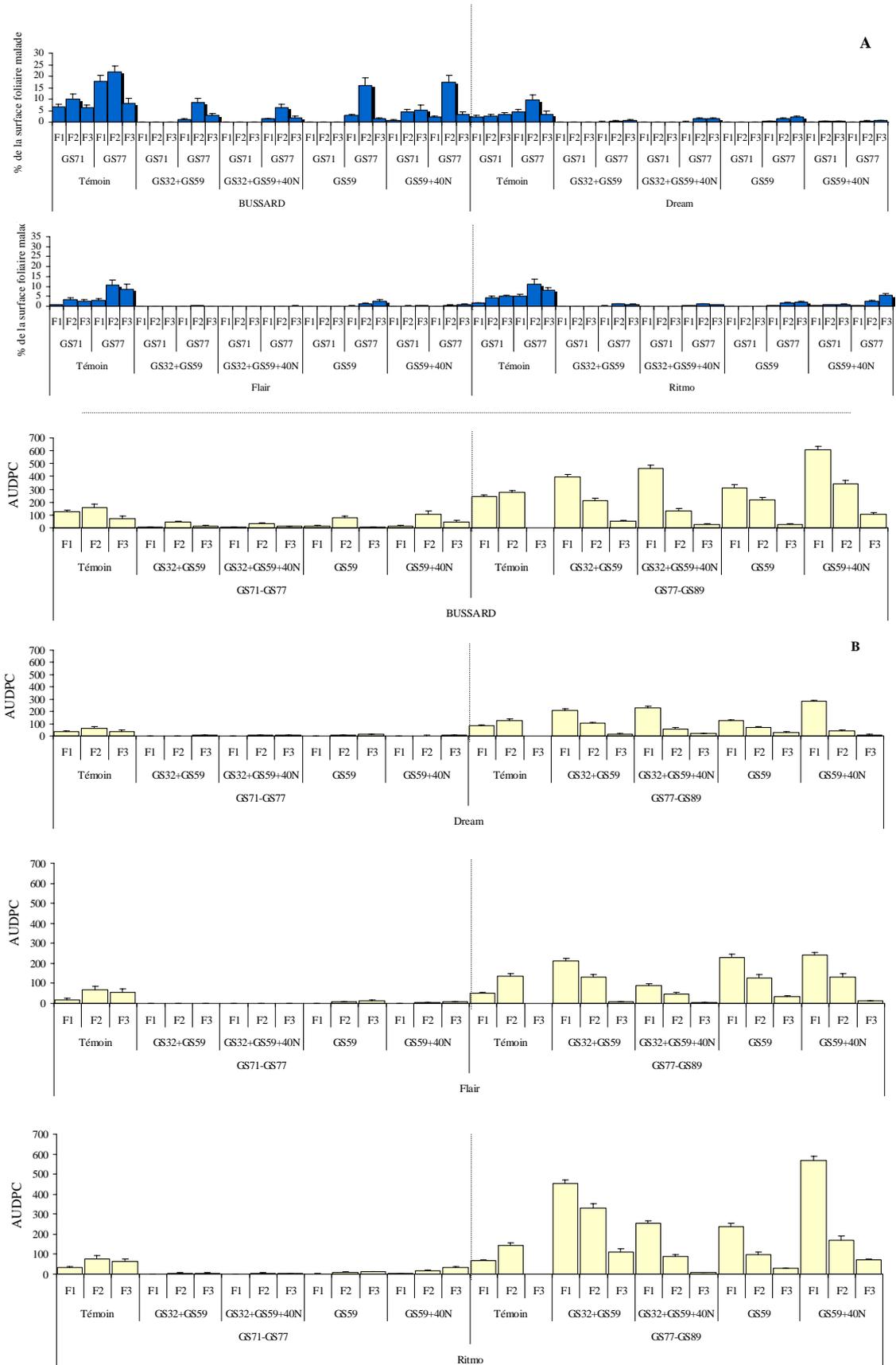
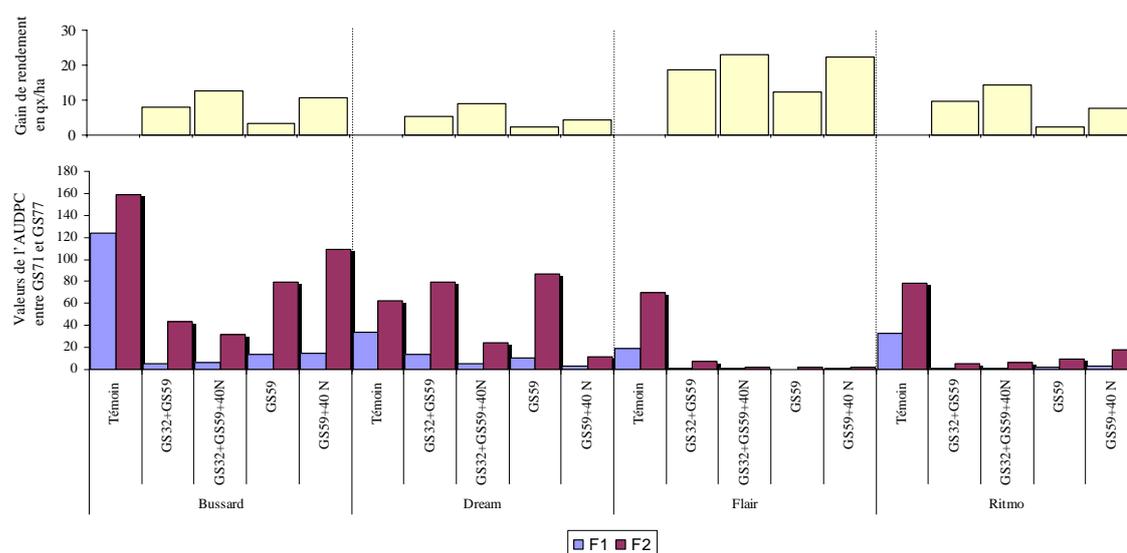


Figure 1-6- 4 : A) Pourcentage de la surface foliaire malade observé des trois dernières feuilles de quatre variétés testées en fonction des différents traitements [GS32+GS59, le premier produit est Opus team (1.5 l/ha) et le deuxième traitement est Allegro (1 l/ha) ; Allegro (1 l/ha) pour GS59] réalisés en 2000 (N=40 unités d'Azote). B) Valeur de l'AUDPC entre les stades GS71 et GS77 et entre les stades GS77 et GS89. En abscisse les stades de croissance (A) et les différentes variantes (A et B).

L'étude de la relation du gain de rendement du double traitement (GS32+GS59) et le traitement réalisé au stade GS59 avec l'AUDPC des deux dernières feuilles (F1 et F2) de Bussard montre une corrélation négative avec la F1 ( $r = - 0.78$  ;  $P < 0.05$ ) et la F2 ( $r = - 0.69$  ;  $P < 0.05$ ) (figure 1-6-5 ; tableau 1-6-1). En 2000, l'helminthosporiose a été présent à Everlange entre les stades GS71 et GS77 sur les feuilles F1 et F2 avec des taux moyens. La distinction entre les parcelles traitées et témoin est nette pour les F1 de toutes les variétés. Cette maladie a eu un effet moyen sur le rendement final (le développement de la maladie a été très important tardivement entre les stades GS77-GS89).



**Figure 1-6- 5 : Variation de l'AUDPC des trois dernières feuilles calculé pour chaque traitement entre GS71 et GS77 et le gain de rendement en 2000 à Everlange.**

**Tableau 1-6- 1 : Etude de la corrélation entre l'AUDPC de F1 et F2 des différents traitements testées calculée entre GS71 et GS77 et le gain de rendement de chaque variété en 2000 à Everlange.**

(\*)  $P < 0.05$

Variétés	Corrélation AUDPC/gain de rendement	
	F1	F2
Bussard	-0.78*	-0.69*
Dream	-0.74*	-0.47
Flair	-0.88*	-0.89*
Ritmo	-0.68*	-0.7*

## IV. Discussion

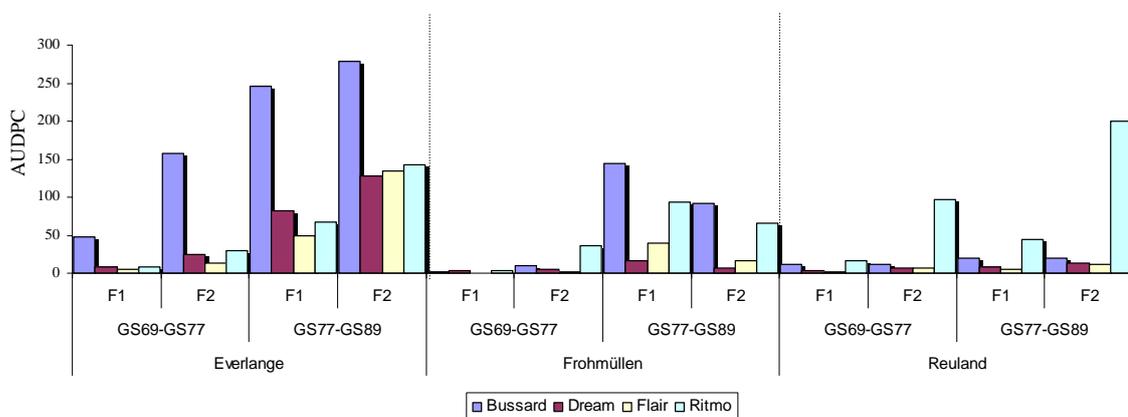
### Epidémiologie de la maladie.

- En 1999, le niveau de la maladie (figure 1-6-1) a été très faible pendant la maturité laiteuse (GS70). La maladie a atteint un niveau spectaculaire à la fin de la saison (GS85) sur les feuilles traitées par rapport aux témoins. A ce stade, les F1 du témoin étaient déjà nécrosées par d'autres maladies (cfr. les paragraphes consacrés à chacune des maladies quantifiés dans cette partie de thèse) telles que la septoriose, la rouille brune etc. et la rémanence du produit (Allegro 1l/ha) était déjà dépassée, ce qui explique le taux spectaculaire de la maladie sur la F1. Mais, cette évolution tardive de la maladie n'a pas trop affecté le gain de

rendement (figure 1-6-2). En effet, une faible corrélation négative ( $r = -0.22$ ) est enregistrée entre le taux de la maladie sur la F1 et le gain de rendement.

En 2000, les conditions épidémiologiques étaient très propices au développement du parasite et la maladie a été observée dès l'épiaison (figure 1-6-3). La distinction est très nette pour les F1 de toutes les variétés entre les parcelles témoin et celles traitées avec un double traitement (GS32+GS59) mais aussi avec un traitement réalisé au stade GS59. Une corrélation négative a été mise en évidence entre le gain de rendement en qx/ha et l'AUDPC de F1 de toutes les variétés testées calculées pour chaque traitement (double traitement, traitement GS59 et témoin) entre GS71 et GS77. Cependant, entre GS77 et GS89, le développement de la maladie a été généralisé à toutes les parcelles traitées et non traitées de toutes les variétés mises en essai à Everlange. Cette maladie a été observée aussi à Reuland et dans la Moselle (Frohmlillen) (figure 1-6-6). Le calcul de l'AUDPC de F1 et F2 des quatre variétés semées dans les trois sites d'essais entre GS69 et GS77 et entre GS77 et GS89 fait ressortir nettement le comportement variétal. L'analyse de variance par la procédure GLM de SAS réalisé sur les données de la maturité et de la fin de la saison donne comme résultats :

- A Everlange, pendant la maturité laiteuse (GS71-GS77), pour les feuilles F2 et F1, c'est la variété Bussard qui a été la plus touchée par la maladie ( $P < 0.0001$ ) par rapport aux autres (Flair Dream et Ritmo). A ce stade, aucune différence significative de la maladie n'a été enregistrée entre Flair, Dream et Ritmo ( $P = 0.7275 > 0.05$ ). Cependant, à la fin de la saison (GS89), même si l'évolution de la maladie est très significative sur toutes les variétés ( $P < 0.001$ ), le degré de la maladie est très variable en fonction des variétés. Bussard est la variété la plus sensible alors que les trois autres tendent vers la résistance.



**Figure 1-6- 6 : Comparaison de l'AUDPC de la F1 et la F2 calculée pour chacune des variétés entre GS69 et GS77 ainsi qu'entre GS77 et GS89 dans les trois sites, Reuland, Frohmlillen et Everlange en 2000.**

- A Reuland, seul Ritmo diffère significativement ( $P < 0.0111$ ) des trois autres variétés semées.
- A Frohmlillen, pendant la maturité, aucune différence significative de la maladie sur la F1 ( $P < 0.055$ ) n'a été enregistrée entre les variétés alors que le degré de la maladie est très variable pour la F2 ( $P = 0.0016$ ). A la fin de la saison, la distinction entre les variétés susceptibles (Ritmo et Bussard) est très remarquable.

### Relation plante-champignon-climat

A la fin de la saison, l'évolution de la maladie a été enregistrée dans les trois sites d'essais. S'agit-il d'une interaction entre les pratiques agricoles au Grand-Duché de Luxembourg et les conditions météorologiques qui ont été très propices à l'évolution de la maladie ?

Pour répondre à cette question, nous avons vérifié les conditions météorologiques (ces conditions météorologiques ont été déterminées sur base de la littérature, en particulier les conditions de LAMARI *et al.*, 1992) qui s'ajustent mieux avec l'évolution de la maladie.

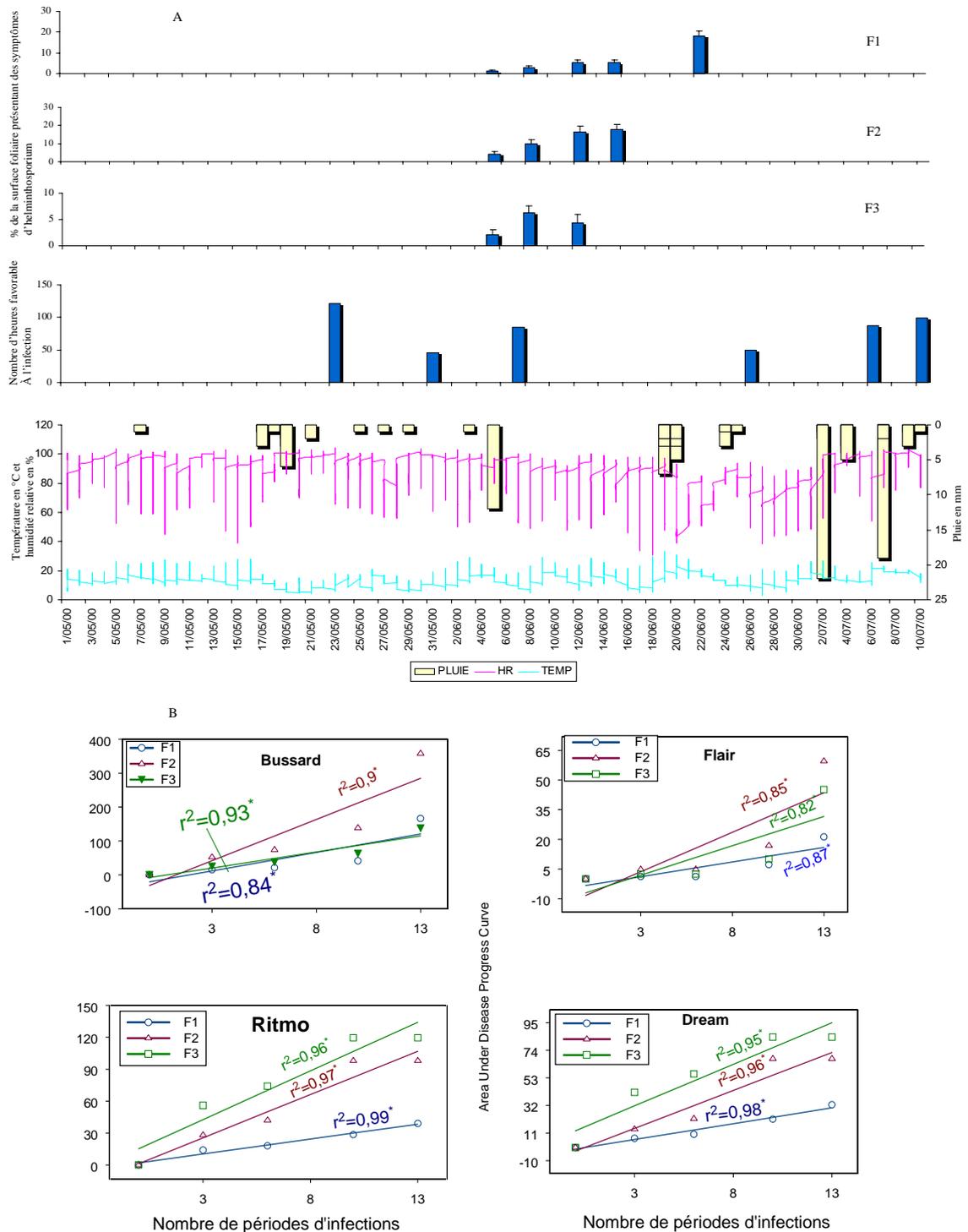
L'helminthosporiose a été observé en 1999 à Everlange mais en 2000, l'évolution de la maladie a été beaucoup plus importante dans ce site par rapport à la Moselle et à Reuland. Le semis a été fait sans labour à Everlange (le précédent culturel est Colza). Cette pratique agricole est la principale source de l'inoculum dans ce site. En 2000, la maladie a été observée dès le début d'épiaison et le maximum de surface foliaire malade a été enregistré au stade maturité laiteuse (GS77). Cette importante évolution de la maladie est la conséquence d'une interaction entre une variété sensible (Bussard) avec un semis sans labour et les conditions météorologiques favorables (figure 1-6-7 A) dès le stade GS39 (19 mai). La première période d'infection favorable à la maladie a été enregistrée au début du stade gonflement (24 mai) avec les conditions météorologiques favorables de plus de cent heures. Les premiers symptômes issus de cette période ont été observés début juin une semaine après cette infection. Les symptômes observés entre le 8 et 12 juin sont issus de la période d'infection du 1<sup>er</sup> juin avec 46 h d'humidité relative supérieure à 70 %, de la pluie et une température comprise entre 11 et 16°C. Entre le 12 et le 15 juin aucun changement significatif de la maladie n'a été observé sur les trois dernières feuilles (F1, F2 et F3). La période du 8 juin avec 85 h d'humidité supérieure à 70 %, des averses et une température entre 11 et 16°C a été à l'origine de l'évolution de la maladie sur la F1 observé le 21 juin. Les périodes d'infections du 26 juin et début juillet étaient à l'origine du développement très important de la maladie observée entre GS77 et GS89 sur toutes les parcelles traitées et non traitées (figure 1-6-4 B). L'analyse de corrélation (figure 1-6-7 B) a révélé un grand ajustement entre le niveau de la maladie enregistré à Everlange et le nombre de périodes d'infection calculées.

En 2001, un retard de la phénologie a été observé par rapport à 2000 et le nombre d'heures de la première période d'infection (GS37) n'atteint pas 34 alors qu'en 2000 le nombre d'heures de cette période était de 121 (figure 1-6-8). La période d'infection la plus importante a été enregistrée le 19 juin avec 89 heures favorables. Cette dernière période a été très pertinente à l'installation de la maladie sur les trois étages foliaires.

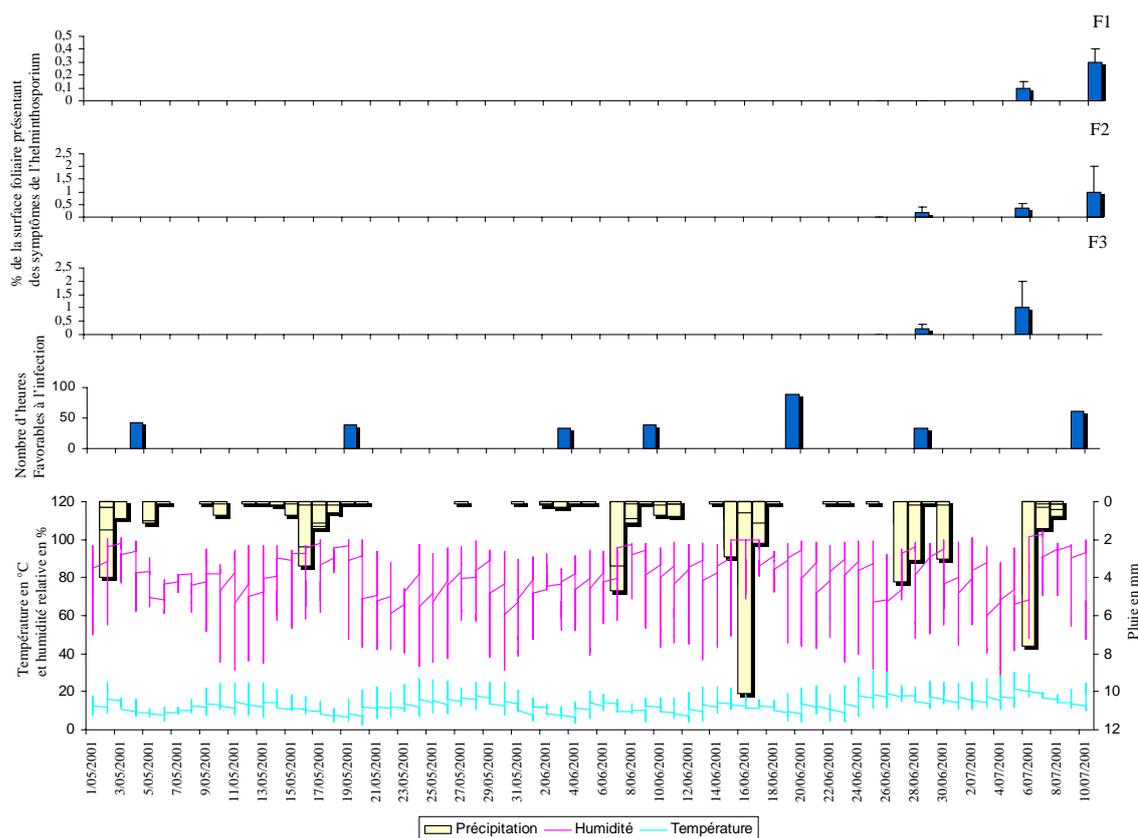
### Relation Hauteur de la plante Maladie

En 1999, nous avons enregistré pour un même groupe de variétés (ayant reçue un régulateur de croissance Cycocel) une variation significative ( $P < 0.001$ ) de la hauteur jusqu'à la dernière feuille entre les parcelles ayant reçu un seul traitement réalisé au stade GS59 et celles ayant subi deux traitements réalisés au stade GS32 et GS59. Les plantes qui ont eu un seul traitement ont eu une hauteur plus importante que celles qui ont subi deux traitements. Ceci pourrait s'expliquer par un effet dépressif du fongicide. L'étude de la corrélation (entre la hauteur de la plante et l'AUDPC calculée pour F1) des parcelles traitées (ayant reçue un même régulateur Cycocel) a révélé un  $r^2 = 0.5$

( $P < 0.05$ ) pour celles traitées au stade GS59 et un  $r^2 = 0.9$  ( $P < 0.05$ ) pour celles traitées aux stades GS32 et GS59. La hauteur pourrait influencer le degré et le niveau de la maladie. Des études supplémentaires seront nécessaires pour approfondir ce concept.



**Figure 1-6- 7 : A) Variation des conditions météorologiques, le nombre d'heures d'infections et le pourcentage de la surface foliaire malade (Bussard) à Everlange entre le 1<sup>er</sup> mai et début juillet 2000. B) Corrélation entre le niveau de la maladie enregistré sur chacune des trois dernières feuilles de chaque variété en 2000 à Everlange et le nombre de périodes d'infections.**



**Figure 1-6- 8 : Variation des conditions météorologiques, le nombre d'heures d'infections et le pourcentage de la surface foliaire malade (Bussard) à Everlange entre le 1<sup>er</sup> mai et début juillet 2001.**

## V. Conclusion

Cette étude sur l'helminthosporiose des feuilles du blé d'hiver fait ressortir un ensemble de points :

- L'helminthosporiose est une maladie qui existe au Grand-Duché de Luxembourg.
- Une sévérité de la maladie généralisée sur toutes les variétés pendant l'année 2000 dans les trois sites d'essai. Les variétés Bussard et Ritmo sont les plus susceptibles à cette maladie.
- L'étude des conditions météorologiques favorables à cette maladie a montré qu'il est possible de prévoir cette maladie et de la maîtriser.
- Cette évolution de la maladie est liée à l'interaction entre les conditions météorologiques et les pratiques culturales et le précédent culturel (surtout blé sur blé). En effet, ces dernières années, les cultures sans labour (l'helminthosporiose est plus importante dans les cultures sans labour que celles avec labour) se pratiquent de plus en plus au Grand-Duché de Luxembourg.
- En plus des variétés susceptibles, certains fongicides sont spécifiques pour la septoriose des feuilles et les rouilles mais peuvent induire un effet d'inversion (DELOS *et al.*, 2001).

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

- 1-6- 1 : Etude de la corrélation entre l'AUDPC de F1 et F2 des différentes traitements testées calculée entre GS71 et GS77 et le gain de rendement de chaque variété en 2000 à Everlange. .... VI-7

## FIGURES

- 1-6- 1 : A) Variation de la surface foliaire présentant des symptômes au stade GS70 et GS85 sur les trois dernières feuilles (F1, F2 et F3) des variétés testées ainsi que l'AUDPC standard calculée entre le stade GS70 et GS85 pour trois variantes testées à Everlange en 1999. B) Analyse de la corrélation entre la hauteur en cm de chaque variété testée avec un régulateur de croissance et l'AUDPC Standard de F1 calculée entre stade GS70 et GS85 pour deux variantes (1 seul traitement et deux traitements) ..... VI-3
- 1-6- 2 : Etude de la corrélation de l'AUDPC de la F1 et la F2 entre GS70 et GS85 des trois variantes testées et le gain de rendement en Kg/ha en fonction de variétés en 1999. Le rendement net est le rendement brut ramené à 15% d'humidité (le blé d'hiver est commercialisé à 15% au Grand-Duché de Luxembourg). ..... VI-4
- 1-6- 3 : Variation du pourcentage de la surface foliaire malade au sein de trois dernières feuilles des variétés testées en 2000 à Everlange ainsi que la variation de l'AUDPC entre GS55 et GS61 ; GS61 et GS70 ; GS70 et GS77. .... VI-4
- 1-6- 4 : A) Pourcentage de la surface foliaire malade observé des trois dernières feuilles de quatre variétés testées en fonction des différents traitements [GS32+GS59, le premier produit est Opus team (1.5 l/ha) et le deuxième traitement est Allegro (1 l/ha) ; Allegro (1 l/ha) pour GS59] réalisés en 2000 (N=40 unités d'Azote). B) Valeur de l'AUDPC entre les stades GS71 et GS77 et entre les stades GS77 et GS89. En abscisse les stades de croissance (A) et les différentes variantes (A et B). ..... VI-6
- 1-6- 5 : Variation de l'AUDPC des trois dernières feuilles calculé pour chaque traitement entre GS71 et GS77 et le gain de rendement en 2000 à Everlange. .... VI-7
- 1-6- 6 : Comparaison de l'AUDPC de la F1 et la F2 calculée pour chacune des variétés entre GS69 et GS77 ainsi qu'entre GS77 et GS89 dans les trois sites, Reuland, Frohmüllen et Everlange en 2000. .... VI-8
- 1-6- 7 : A) Variation des conditions météorologiques, le nombre d'heures d'infections et le pourcentage de la surface foliaire malade (Bussard) à Everlange entre le 1<sup>er</sup> mai et début juillet 2000. B) Corrélation entre le niveau de la maladie enregistré sur chacune des trois dernières feuilles de chaque variété en 2000 à Everlange et le nombre de périodes d'infections. .... VI-10
- 1-6- 8 : Variation des conditions météorologiques, le nombre d'heures d'infections et le pourcentage de la surface foliaire malade (Bussard) à Everlange entre le 1<sup>er</sup> mai et début juillet 2001. .... VI-11

## PHOTOS

- 1-6- 1 : Tâches helminthosporiennes bien nettes sur les deux feuilles traitées et témoin et l'identification des deux souches. La photo d a été prise avant l'induction des conidiospores et conidies. Echantillons récoltés par El JARROUDI, M. (Université de Liège). Photos microscopiques prises par MERCADO VERGNES (FYMY, UCL). .... VI-5

## REFERENCES

- ADEE, E. A. & W. F. PFENDER (1989). "The effect of primary inoculum level of *Pyrenophora tritici-repentis* on tan spot epidemic development in wheat." *Phytopathology* **79**: 873-877.
- ALI, S., L. J. FRANCL & E. D. DE WOLF (1999). "First Report of *Pyrenophora tritici-repentis*, Race 5 from North America." *Plant disease* **83**: 591.
- DELOS, M., J. GATELLET, R. IOOS, Y. DACQUEY, A. FAURE, C. GRIMPET & D. CARON (2001). "Maladies des feuilles du blé et biovigilance face aux PCR et tests Elisa, le diagnostic visuel des symptômes "de type septoriose" est-il encore utile ?" *Défense des végétaux* **537**: 30-34.
- FERNANDEZ, M. R., J. M. CLARKE & R. M. DE PAUW (2002). "The effect of plant height on Tan Spot on durum Wheat in Southern Saskatchewan." *Crop Sci.* **42**: 159-164.
- FRANCL, L. (1997). *Components of the Tan Spot Disease Cycle*. An International Workshop Held at CIMMYT. EL Batan. Mexico. ISBN 970-648-001-3. pp. 28-36.
- HOSFORD, J., R.M. (1982). Tan spot-developing knowledge 1902-1981. In *Tan Spot of wheat and related Disease*. Fargo. Workshop R.M. Hosford, Jr. Ed. North Dakota State University. pp. 1-5.
- HOSFORD, J. R. M., J. G. JORDAHL & J. J. HAMMOND (1990). "Effect of wheat genotype, leaf position, growth stage, fungal isolate, and wet period on tan spot lesions." *Plant Dis.* **74**: 385-390.
- JAMES, W. C. (1976). *Manual of plant growth stages and diseases assessment keys*. Ministry of Agriculture Fisheries. Food. (sans volume).
- LAMARI, L., C. C. BERNIER & G. M. BALLANCE (1992). *The necrosis-chlorosis model in tan spot on wheat*. Proceedings of the 2nd International Tan Spot Workshop. Fargo. ND. USA. North Dakota Agricultural Experiment Station. pp. 10-15.
- REES, R. G. & G. J. PLATZ (1983). "Effects of yellow spot on wheat: Comparison of epidemics at different stages of crop development." *Aust.J.Agric.Res.* **34**: 39-46.
- WATKINS, J. E., G. N. ODVODY, M. G. BOOSALIS & J. E. PATRIDGE (1978). "An epidemic of tan spot of wheat in Nebraska." *Plant Dis.Rep.* **62**: 132-134.
- WRIGHT, K. H. & J. C. SUTTON (1990). "Inoculum of *Pyrenophora tritici-repentis* in relation to epidemics of tan spot of winter wheat in Ontario." *Can J Plant Pathol* **12**: 149-157.

---

**CHAPITRE VII****EPIDÉMIOLOGIE DE L'OÏDIUM AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG**

---

---

L'oïdium a connu un développement assez important dans la Moselle luxembourgeoise en 2000 et à Reuler en 2003. La différence du niveau de maladie entre les différentes variétés testées dans un même site a été très hautement significative ( $P < 0.001$ ). Un climat doux et humide favorise l'expansion de la maladie. Cependant, le taux maximal de la maladie qui a été enregistré est le résultat d'une interaction entre les conditions climatiques favorables à l'infection et certaines pratiques agricoles en début de saison : a) un apport plus important de la fumure azotée qui facilite la création d'un microclimat propice à la maladie. Dans la Moselle, en 2000, la différence des éléments minéraux importants dans la croissance du blé ( $P_2O_5$  et l'azote minéral) entre deux blocs du même champ a été à l'origine d'une différence très hautement significative ( $P < 0.001$ ) de la maladie entre les deux blocs ; b) le choix du moment de traitement est très important. A Reuler en 2003, le traitement réalisé au stade GS59 n'a assuré aucune protection des trois dernières feuilles contre l'oïdium. En général, les traitements réalisés avant le stade GS59 et plus particulièrement au stade GS37 ont été très efficaces. La corrélation entre l'AUDPC (Area Under the Disease Progress Curve) relative (en %) de ces traitements (par rapport au témoin) et le gain de rendement net en kg/ha a montré un  $r^2$  de 0.6 pour F1 et proche de 1 pour F2.

---

**I. Introduction**

L'oïdium, causé par *Blumeria graminis* (DC.) SPEER f. sp. *tritici* Em. Marchal, est la principale maladie foliaire affectant le blé d'hiver dans les climats maritimes caractérisés par des températures douces (ZELLER *et al.*, 2002).

Cette maladie peut causer des dégâts très importants (GE *et al.*, 1998)(le rendement final pourrait être affecté de plus de 17%) sur cultivars susceptibles si les conditions météorologiques lui sont favorables (LEATH & BOWEN, 1989 *in* ZELLER, 2002).

L'histoire de la culture intensive du blé en monoculture, a favorisé l'adaptation rapide du champignon et une érosion de la résistance des variétés (SVEC & MIKLOVICOVA, 1998). Des variétés mixtes ainsi que celles possédant la résistance spécifique ou non spécifique à ce parasite renforcent le contrôle biologique de la maladie.

En plus des variétés, une attention particulière devrait être accordée à la caractérisation des microclimats favorables au champignon (WOLFE & LIMPET, 1987 ; FELSENSTEIN *et al.*, 1991 ; ZELLER & FISCBECK, 1992 ; ANDRIVON & DE VALLAVIEILLE-POPE, 1993).

Le but de ce chapitre est de caractériser l'importance de cette maladie sur chacun des sites d'essai (Everlange, Reuland, Emerange) pendant les années 1999, 2000, 2001, 2002 et 2003 ainsi qu'à Reuler en 2003.

## II. Matériels et méthodes

Le plan et le dispositif des expérimentations réalisés dans les trois sites (Everlange, Reuland et Moselle) pendant les années 1999, 2000, 2001, 2002 et 2003 et à Reuler en 2003 sont développés en détail dans le chapitre 1 et 2 de cette partie.

Pour rappel, huit variantes (tableau 1-7-1) ont été testées à Reuler en 2003 sur la variété Bussard (semée le 5 novembre 2003), dans le cadre du projet SINTAMA (Conception et élaboration d'un système intégré d'avertissement des maladies cryptogamiques du blé d'hiver au Luxembourg) financé par le Ministère de l'Agriculture Luxembourgeoise et coordonné par le CRP-Gabriel Lippmann en collaboration avec l'Université de Liège et l'Unité de Phytopathologie de l'UCL.

**Tableau 1-7-1 : Calendrier des pulvérisations fongicides réalisées en 2003 à Reuler et le produit qui a été testé.**

Traitement	Date d'application	Produit
1 T GS 32	12 Mai 2003	Opéra 1.5 l/ha
2 T	1 T GS 32 12 Mai 2003	Sphère 1 l/ha
	1 T GS 59 12 Juin 2003	Horizon 1l/ha
½ dose	½ GS 37 27 Mai 2003	Sphère 0.5 l/ha
	½ GS 59 12 Juin 2003	Horizon 0.5 l/ha
	1 T GS 39 06 Juin 2003	Opéra 1.5 l/ha
	1 T GS 59 12 Juin 2003	Horizon 1 l/ha
	1 T Modèle 12 Juin 2003	Opéra 1.5 l/ha

La maladie a été quantifiée (pourcentage de la surface foliaire malade) au cours de chaque campagne d'observation selon les échelles de sévérité de JAMES (1976) (cf. chapitre I). Pour visualiser l'évolution de la maladie en fonction de la croissance de la plante, nous avons calculé le paramètre Area Under the Disease Progress Curve (AUDPC) utilisé par SHANER & FINNEY (1977) pour faire la synthèse de la progression de la sévérité de la maladie. L'AUDPC se calcule par la formule suivante (équation 1-7-1) :

$$AUDPC = \sum_{i=1}^n [(x_i + x_{i-1}) / 2] (t_i - t_{i-1}) \quad \text{Equation 1-7-1}$$

Où n représente le nombre de temps d'évaluations de la maladie sur le terrain,  $x_i$  est l'intensité de la maladie mesurée à chaque observation, et  $(t_i - t_{i-1})$  est la durée de temps en jours.

Seuls les sites et les variétés où la maladie a été enregistrée seront analysés dans ce chapitre.

Nous avons testé la linéarité de la relation qui existe entre le rendement net à 15% et l'AUDPC calculé pour les trois dernières feuilles (F1 à F3, F1 est la dernière feuille formée). Ce rendement net ramené à 15% d'humidité (le blé d'hiver est commercialisé à 15 % au Grand-Duché de Luxembourg) a été calculé à été calculé par l'équation 1-7-2 :

$$\text{Rdt net} = (((\text{Rdt brut} - (\text{TR}\% * \text{Rdt brut})) / 0.85) \quad \text{Equation 1-7-2}$$

Avec Rdt net = Rendement net en qx/ha ; Rdt brut = Rendement brut observé en qx /ha ; TR = Taux humidité observé en % ; 0,85 = Taux d'humidité ramené à 15 %.

### III. Résultats et discussion

Pendant les cinq années de mesures la maladie n'a été enregistrée qu'en Moselle (Fromüllen) en 2000, sur la variété Ritmo (figure 1-7-1, photo 1-7-1) et à Reuler en 2003 sur la variété Bussard (figure 1-7-1). La maladie est exprimée en pourcentage de la surface foliaire des trois étages foliaires (F3, F2 et F1) présentant des symptômes. Nous avons comparé la variation de l'AUDPC entre deux stades phénologiques où la maladie a été enregistrée. En 2001 et 2002, la maladie était absente durant toute la campagne d'observation.

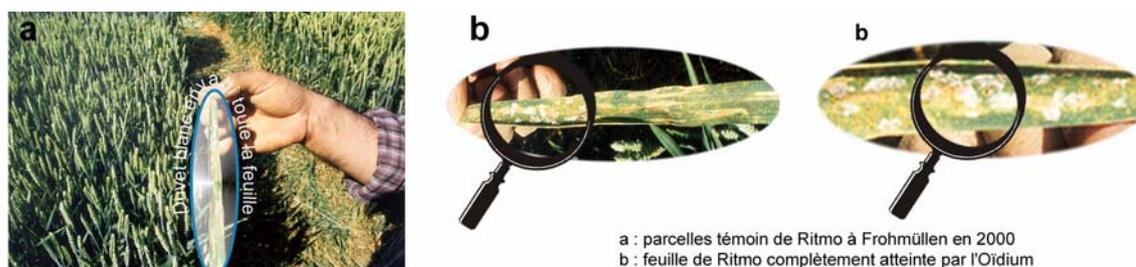


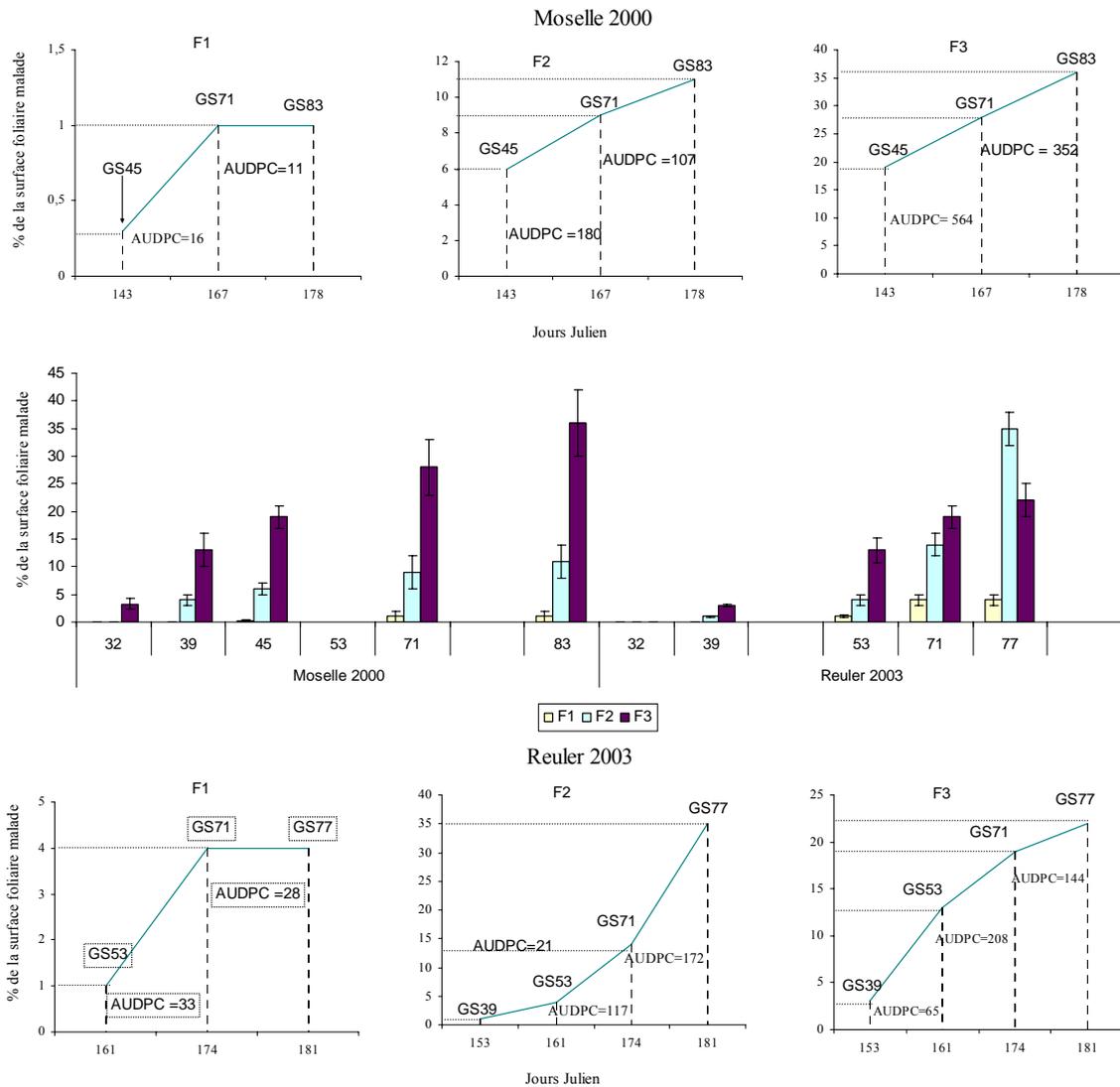
Photo 1-7- 1 : Importance de l'Oïdium à Frohmüllen en 2000 sur la variété Ritmo.

#### Année 2000

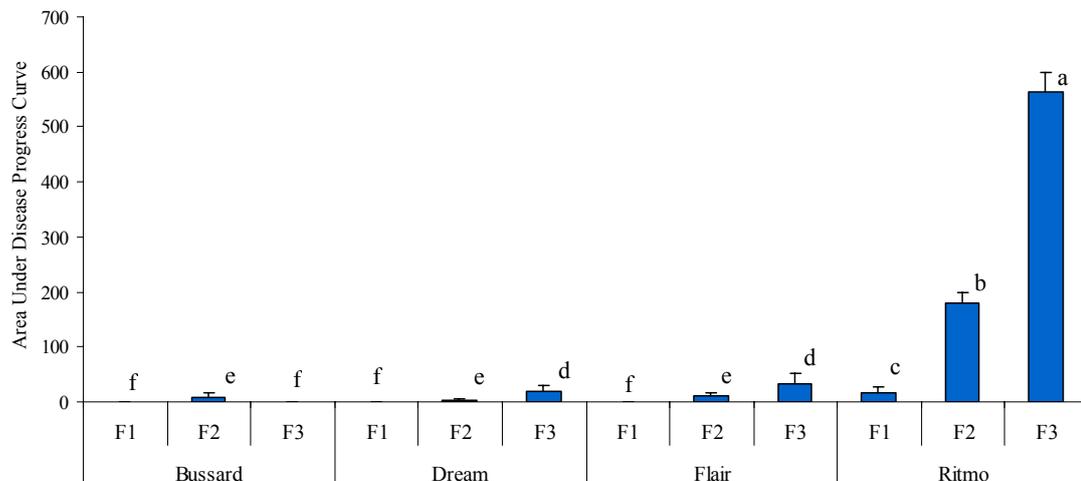
En 2000, dans la Moselle luxembourgeoise, la maladie ne s'est développée fortement que sur la variété Ritmo (figure 1-7-1). La maladie enregistrée sur les trois derniers étages foliaires de Ritmo diffère significativement ( $P < 0.05$ ) par rapport aux autres variétés (figure 1-7-2) ainsi que par rapport à la localisation de la variété dans le champ. Seules les répétitions situées dans la première ligne du champs présentaient un degré important de maladie par rapport à celles se trouvant à l'intérieur.

L'AUDPC relative [AUDPC relative = AUDPC (F 3) à l'intérieur du champ/AUDPC (F3) première ligne \*100] en % de F3 des parcelles se trouvant à l'intérieur du champ ne présente que 18 % de l'AUDPC relative de celles de la première ligne. Une hypothèse plausible peut être celle liée à un apport azoté plus important en bordure de champ qu'à l'intérieur. Ceci a pu provoquer une végétation plus abondante et plus dense créant des conditions météorologiques favorables sur une variété sensible.

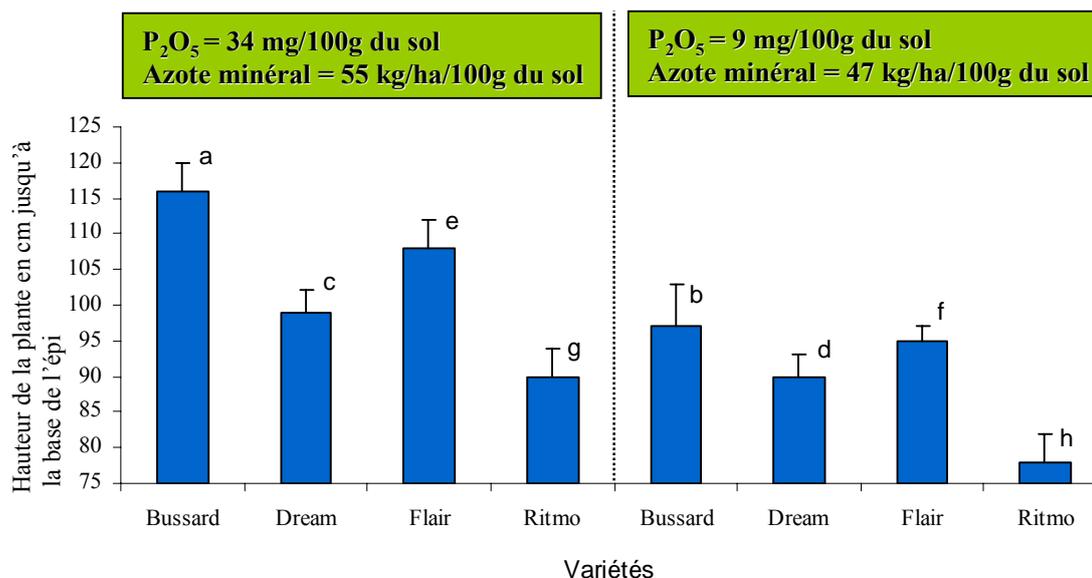
Pour vérifier cette hypothèse, nous avons analysé le 19 juin 2000 (début de la maturité du blé) des échantillons du sol des parcelles de la première ligne du champ avec celles de l'intérieur du champ (cf. chapitre 1 de cette partie pour les résultats d'analyse). Les résultats indiquent un lien entre la variation de l'AUDPC dans le champ et la dose de  $P_2O_5$  (mg / 100 g du sol). Ainsi, AUDPC a été de 737 pour une dose de phosphore de 34 mg/100 g du sol (première ligne) par rapport à une AUDPC de 136 pour une dose de phosphore de 8 mg /100 mg du sol. La dose de l'azote minéral diffère aussi entre la première ligne (55 kg/ha) et la deuxième ligne (47 kg/ha). Cependant, c'est la variation du phosphore qui est hautement significative ( $P < 0.001$ ) entre les deux parties du champ. Cette dose de phosphore enregistrée dans la première ligne associée à l'azote minérale a favorisé une croissance assez importante des plantes (figure 1-7-3). Avec cette hauteur atteinte, les plantes de Ritmo (susceptible) ont plus tendance à se chevaucher et à créer à leur base un microclimat favorable à l'oïdium.



**Figure 1-7- 1 : Evolution du % de la surface foliaire présentant des symptômes et de l’AUDPC à Frohmüllen en 2000 sur Ritmo et 2003 à Reuler sur Bussard. L’AUDPC a été calculé pour les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1). L’échelle des abscisses de la figure représentant le pourcentage de la surface foliaire malade correspond aux stades phénologiques selon ZADOKS *et al.* (1974)**



**Figure 1-7- 2 : Variation de l’AUDPC en fonction de variétés en 2000 à Frohmüllen entre stade GS45 et GS71. Les lettres différentes symbolisent une différence significative au seuil de 5 % entre les variétés pour le même étage foliaire.**



**Figure 1-7- 3 : Variation de la hauteur de la plante au début de la maturité laiteuse (GS71) des quatre variétés testées en fonction de la dose de phosphore. Les lettres différentes représentent une différence significative de la hauteur au seuil  $\alpha$  de 5 % pour la même variété à deux doses différentes de  $P_2O_5$  et de l'azote minéral.**

Ce microclimat créé par les plantes a tendance à propager et conserver l'inoculum d'oïdium endogène sur les feuilles situées à la base par rapport à la F1. Ce qui explique l'importance de la maladie enregistrée sur F3 par rapport à F2 et F1. Le pourcentage de la surface foliaire enregistré sur les trois dernières feuilles et l'AUDPC relative calculée pour chacun des trois étages foliaires supérieurs à Frohmüllen, confirme notre raisonnement (tableau 1-7-2).

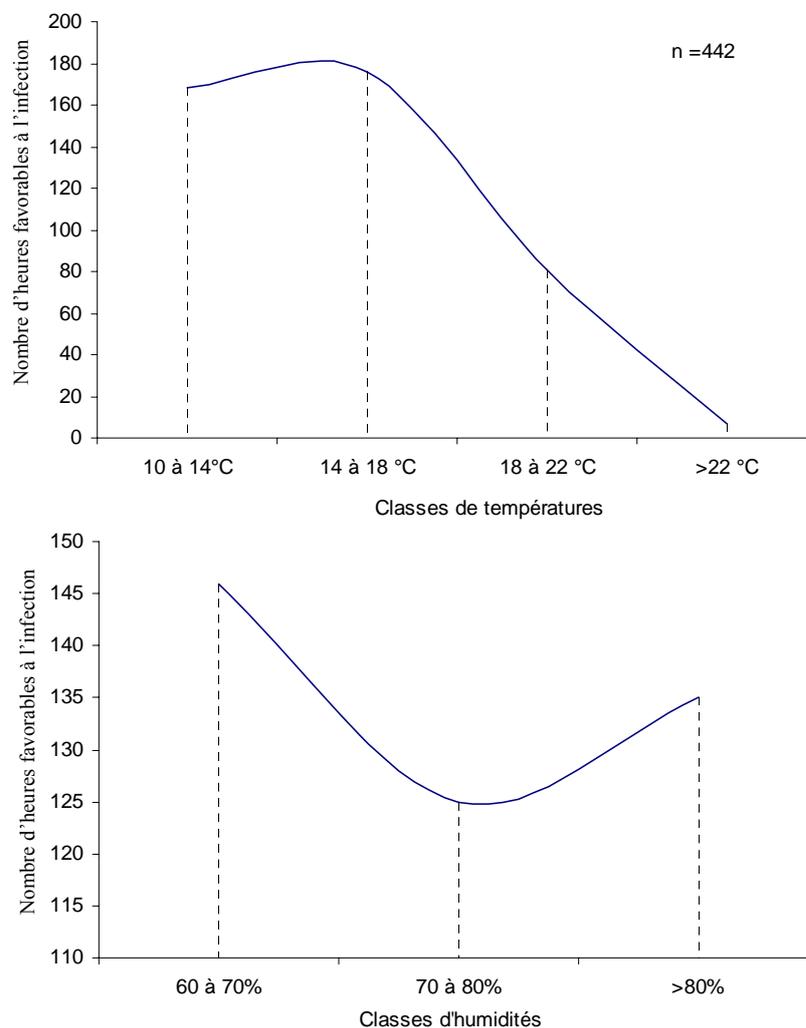
**Tableau 1-7- 2 : Variation de l'AUDPC relative de F2 et F1 par rapport à F3 à Frohmüllen en 2000.**

Stade	AUDPC Relative (%) F1	AUDPC Relative (%) F2
GS39	0	23
GS45	1	28
GS71	2	31
GS83	3	31

En plus de ce microclimat généré par les plantes et les conditions du milieu, les températures enregistrées dans la Moselle créent un climat favorable à cette maladie qui dépend beaucoup de ce facteur. Dans leur étude, WARD & MANNERS (1974) et AKAI (1952) ont montré que l'optimum de température pour le développement du mycélium de ce champignon est de 20°C et la gamme de température favorable à l'infection est plus large. Cependant la limite supérieure pour l'infection est de 30°C. Dans la Moselle, le nombre de jours favorables au parasite avec une température supérieure à 10°C associé à une humidité supérieure à 60 % et sans pluie était de 18 jours (soit 442 heures) entre le début d'émergence des deux dernières feuilles (début mai) et la maturité laiteuse (fin juin). Dans cet intervalle de conditions favorables au parasite, ce sont surtout les classes de températures situées entre 14 et 18°C et entre 10 et 14°C qui dominaient avec respectivement comme nombre d'heures 176 et 168 (figure 1-7-4). En ce qui concerne les humidités, c'est la classe entre 60 et 70 % (146) qui dominait suivie de celle avec une humidité relative supérieure à 80 % (135). Ainsi, cette évolution remarquable de la maladie à Frohmüllen en 2000 est le résultat d'une interaction entre le climat doux qui caractérise cette région de la Moselle et, surtout, l'effet variétal qui était très important.

**Année 2003**

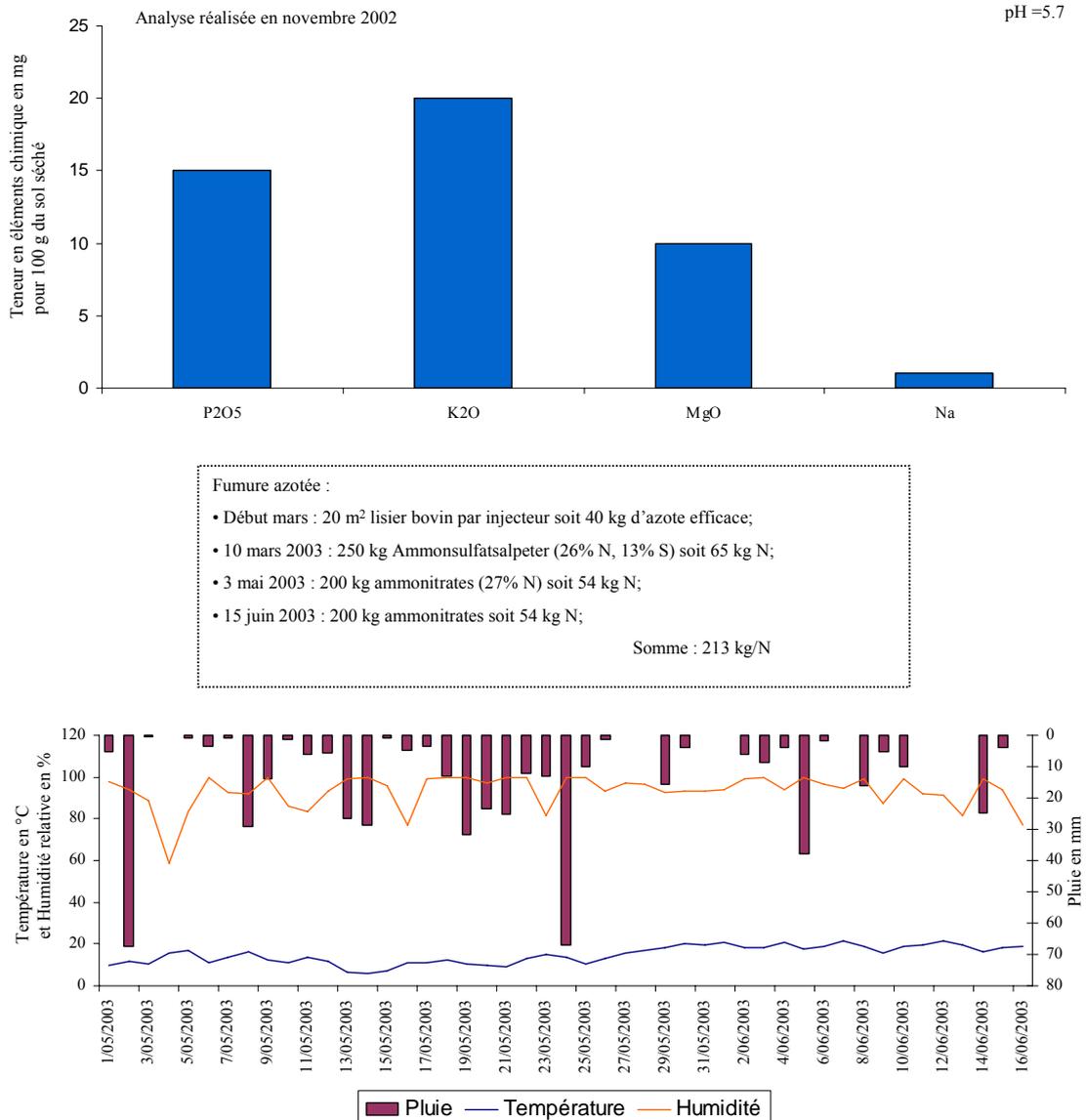
En 2003, l'oïdium a connu une évolution assez remarquable à Reuler. Cette évolution se remarque nettement sur la F3 par rapport à F2 et F1. L'AUDPC relative (%) de F2 représente 71 % de celle de F3 alors que celui de F1, ne représente que 14 %. Par conséquent, comme à Frohmüllen en 2000, ce sont les feuilles F2 et F3 qui sont touchées. Reuler est un site de 7.9 ha qui se trouve au nord-est du Grand-Duché de Luxembourg qui se caractérise par une forte humidité pendant une grande partie de l'année et un pH qui tend vers l'acidité (figure 1-7-5). Cette évolution a atteint son maximum entre l'épiaison et la maturité. Ceci pourrait s'expliquer par : a) les températures et les humidités (figure 1-7-5) qui sont favorables pour le développement de ce champignon ; b) en plus de ces conditions météorologiques favorables, les pratiques agricoles ont aussi favorisé l'installation de la maladie. En effet, l'apport de la fumure azotée a été de 213 kg d'azote minéral (figure 1-7-5).



**Figure 1-7- 4: Nombre d'heures des différentes classes de température et d'humidité relative calculé dans l'intervalle de conditions favorables au champignon (température supérieure à 10°C associé à une humidité supérieure à 60% et sans pluie) dans la Moselle entre début mai et fin juin 2000 (station météorologique de Findel).**

Cependant, à Reuler, les AUDPC enregistrées sur la F3 sont très inférieures à celles enregistrées à Frohmüllen en 2000. L'analyse des données météorologiques du mois de mai (figure 1-7-5) révèle de fortes pluies pendant les trois premières décades de mai.

Ces fortes pluies ont tendance à nuire la dissémination du champignon en l’entraînant au sol et dans les étages foliaires inférieurs.



**Figure 1-7- 5 :** Analyse du sol à Reuler en Novembre 2002 (figure du haut) ; les différents apports de la fumure azotée (tableau) et la variation des paramètres météorologiques (température en °C, humidité en % et pluie en mm) entre le 1<sup>er</sup> mai et le 15 juin 2003.

### Effet de traitement

En 2000, le double traitement appliqué au stade GS45 (Opus team 1,5 l/ha) et GS60 (Allegro 1 l/ha) ont permis de freiner l’oïdium mais n’a pas permis de la stopper complètement (tableau 1-7-3). En appliquant le traitement, l’AUDPC relative de la F1 traitée ne représente que 7 % du témoin, mais celle de la F2 et la F3 est proche ou constitue la moitié de celle du témoin. La comparaison du rendement net de la parcelle traitée et témoin, témoigne de l’importance du traitement (20 % de gain). Ce gain de rendement du double traitement par rapport au témoin est le résultat d’une protection combinée contre l’oïdium mais aussi la rouille brune qui était importante sur Ritmo en 2000 (cf. chapitre IV de cette première partie de thèse).

**Tableau 1-7- 3 : Effet de traitement au stade GS45 (Opus team 1.5 l/ha) et GS60 (Allegro 1 l/ha) sur le rendement net (kg/ha) en 2000 dans la Moselle. L’AUDPC a été calculée entre le début de la floraison (GS60 enregistré le 5 juin) et le début de la maturité laiteuse (GS71 enregistré le 15 juin).**

Traitement	AUDPC			RDT
	F1	F2	F3	
Témoin	16	180	564	7750
GS45 + GS60	2	50	185	9333

En 2003, la maladie a été observée dans toutes les parcelles traitées à des degrés variables selon le moment de traitement (figure 1-7-6). Ceci montre que la gamme de produits testés dans nos essais n’assure pas une efficacité complète contre l’oïdium. En effet, une résistance de l’oïdium aux strobilurines et au quinoxyfen a été signalé depuis plusieurs années en Europe occidentale (MOREAU, 2004). L’analyse de la surface foliaire présentant des symptômes de l’oïdium au stade GS53 et au début du stade GS71 des différents traitements testés (figure 1-7-6) montre que les traitements réalisés avant l’épiaison étaient plus efficaces par rapport à celui de l’épiaison. Ceci pourrait s’expliquer par une différence de produits appliqués entre les stades phénologiques. En effet, au stade GS59, le produit appliqué est Horizon (1 l/ha) alors que celui du stade GS37 est Opéra (1.5 l/ha). Cette différence est probablement due plus au type de produit appliqué et à son efficacité intrinsèque qu’au moment de traitement. Cependant, même pour un même produit (Opéra 1.5 l/ha) une différence significative a été mise en évidence à l’épiaison (figure 1-7-6) entre les traitements réalisés au stade GS37 et au stade GS39. L’efficacité des traitements GS32 et GS37 est plus importante que celle du traitement GS39. Ce qui signifie que le moment d’application joue un rôle aussi important que le type de produit appliqué.

Le calcul de l’AUDPC (calculé pour chacun des trois derniers étages foliaires) de chaque traitement entre le stade GS53 et GS71 (figure 1-7-7) a révélé que le traitement réalisé au stade GS59 (horizon 1 l/ha) n’avait aucune efficacité contre l’oïdium. Le traitement réalisé au stade GS37 (Opéra 1.5 l/ha) a eu la même efficacité que deux demi-doses appliquées respectivement au stade GS37 (Opéra 0.75 l/ha) et au stade GS59 (Horizon 0.5 l/ha). Ces deux variantes ont assuré une meilleure protection des deux dernières feuilles contre l’oïdium. Les résultats de corrélation montrent bien cette tendance. Le gain de rendement augmente au fur et à mesure que l’AUDPC relative s’éloigne de témoin pris comme référence (100 %). Cette corrélation s’explique beaucoup mieux avec la F1 ( $r^2 = 0.6$ ,  $P < 0,001$ ) qu’avec la feuille F2 ( $r^2 = 0.4$ ,  $P < 0,001$ ) et F3 ( $r^2 = 0.3$ ). Pour la F2, c’est le traitement réalisé au stade GS59 qui n’a pas assuré l’efficacité de cette feuille. L’AUDPC calculée pour ce traitement entre stade GS53 et GS71 est supérieure au témoin.

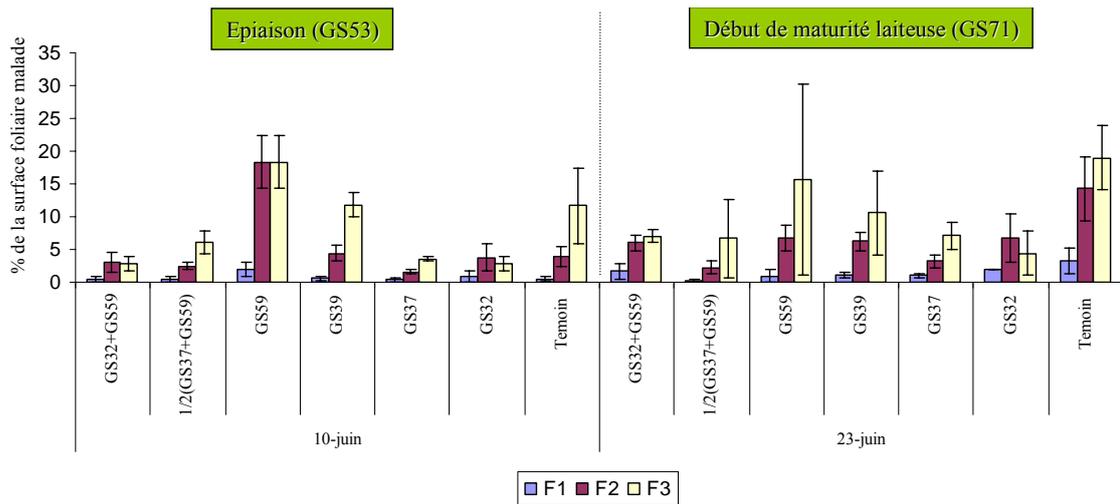


Figure 1-7- 6 : Variation du pourcentage de la surface foliaire présentant des symptômes en fonction des différents traitements testés entre l'épiaison et le début de maturité laiteuse à Reuler en 2003. Echelle en abscisse correspond aux stades d'application du produit fongicide. Les fongicides appliqués sont : i) Opera (1.5 l/ha) pour les stades GS32 à GS39 et la première demi-dose appliqué au stade GS37 ; ii) Horizon (1l/ha) pour le stade GS59 et la demi-dose GS59.

L'AUDPC relative calculée par rapport au témoin est supérieure à 100 %. Si l'on compare les autres traitements au témoin sans prendre en considération le traitement GS59, le coefficient de détermination devient plus important ( $r^2 = 0,9$  ;  $P < 0,001$ ).

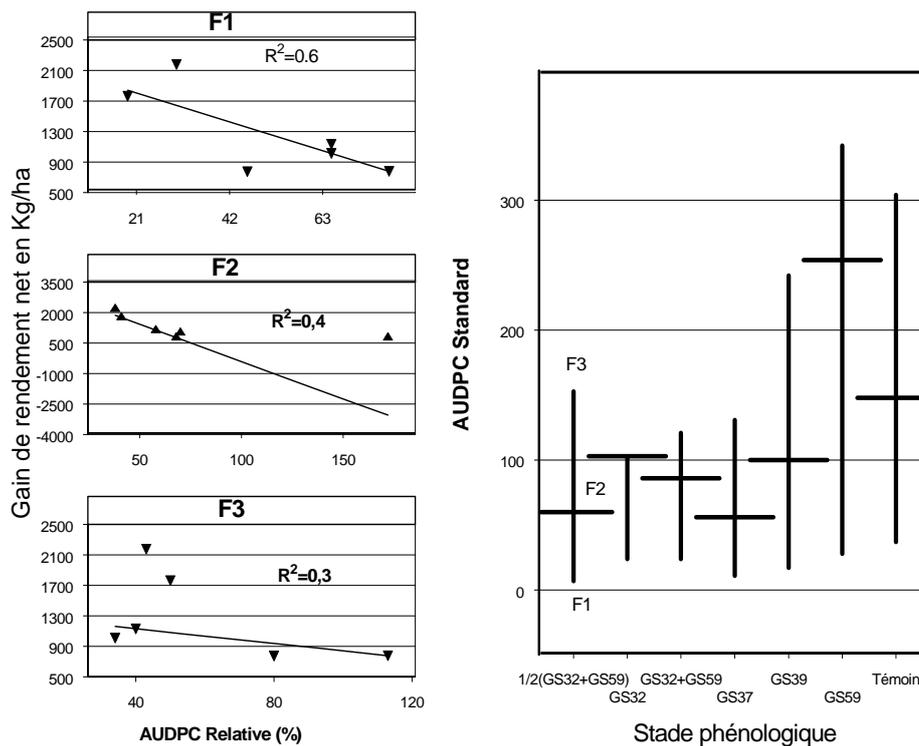


Figure 1-7- 7 : Variation de l'AUDPC standard au sein des trois dernières feuilles en fonction des traitements en 2003 et résultats de corrélation de l'AUDPC relative de chacun des trois derniers étages foliaires avec le gain de rendement net en kg/ha.

---

## IV. Conclusion

Cette étude de l'oïdium fait ressortir un certain nombre de points :

- L'oïdium est une maladie qui existe au Grand-Duché de Luxembourg et varie selon les variétés semées ainsi que le climat local.
- La gamme des produits utilisés dans nos essais n'assure pas une efficacité complète de traitement. Il serait important de tester d'autres produits appliqués contre l'oïdium (Stéréo par exemple).
- La protection de la culture du blé contre cette maladie dépend beaucoup du type de produit mais aussi du moment d'application. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer la meilleure dose et le mélange le plus efficace pour une bonne protection de la plante.
- Les pratiques culturales (surtout les problèmes liés à l'épandage des engrais) concourent à l'établissement de l'oïdium (un microclimat favorable à l'échelle de la parcelle).
- La relation entre le gain de rendement net et l'AUDPC relative est linéaire. Cette maladie a eu un effet sur le rendement net en 2003 à Reuler. Dans cette étude, nous n'avons pas développé les fonctions de dommage lié à l'effet de l'interaction entre deux ou plusieurs parasites. Ceci est très important mais nécessite des expériences et des relations mathématiques spécifiques qui n'entrent pas dans l'objectif principal de cette thèse.
- Le caractère régional de la maladie en fonction de certains microclimats du Grand-Duché du Luxembourg et les effets de cette maladie sur le rendement final rendent indispensable la mise en place d'un modèle de simulation. En effet, des modèles déterministes de simulation de l'extension des pustules, de la différenciation des conidiophores et de la formation des oïdies ont été proposés par QUINN *et al.* (1985). Ces modèles permettent une prévision de la quantité d'oïdies produites en fonction de la température.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

1-7- 1 : Calendrier des pulvérisations fongicides réalisées en 2003 à Reuler et le produit qui a été testé .....	VII-2
1-7- 2 : Variation de l'AUDPC relative de F2 et F1 par rapport à F3 à Frohmùllen en 2000. ....	VII-5
1-7- 3 : Effet de traitement au stade GS45 (Opus team 1.5 l/ha) et GS60 (Allegro 1 l/ha) sur le rendement net (kg/ha) en 2000 dans la Moselle. L'AUDPC a été calculée entre le début de la floraison (GS60 enregistré le 5 juin) et le début de la maturité laiteuse (GS71 enregistré le 15 juin). ....	VII-8

## FIGURES

1-7- 1 : Evolution du % de la surface foliaire présentant des symptômes et de l'AUDPC à Frohmùllen en 2000 sur Ritmo et 2003 à Reuler sur Bussard. L'AUDPC a été calculé pour les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1). L'échelle des abscisses de la figure représentant le pourcentage de la surface foliaire malade correspond aux stades phénologiques selon ZADOKS <i>et al.</i> (1974) .....	VII-4
1-7- 2 : Variation de l'AUDPC en fonction de variétés en 2000 à Frohmùllen entre stade GS45 et GS71. Les lettres différentes symbolisent une différence significative au seuil de 5 % entre les variétés pour le même étage foliaire. ....	VII-4
1-7- 3 : Variation de la hauteur de la plante au début de la maturité laiteuse (GS71) des quatre variétés testées en fonction de la dose de phosphore. Les lettres différentes représentent une différence significative de la hauteur au seuil $\alpha$ de 5 % pour la même variété à deux doses différentes de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> et de l'azote minéral. ....	VII-5
1-7- 4 : Nombre d'heures des différentes classes de température et d'humidité relative calculé dans l'intervalle de conditions favorables au champignon (température supérieure à 10°C associé à une humidité supérieure à 60% et sans pluie) dans la Moselle entre début mai et fin juin 2000 (station météorologique de Findel). ....	VII-6
1-7- 5 : Analyse du sol à Reuler en Novembre 2002 (figure du haut) ; les différents apports de la fumure azotée (tableau) et la variation des paramètres météorologiques (température en °C, humidité en % et pluie en mm) entre le 1 <sup>er</sup> mai et le 15 juin 2003. ....	VII-7
1-7- 6 : Variation du pourcentage de la surface foliaire présentant des symptômes en fonction des différents traitements testés entre l'épiaison et le début de maturité laiteuse à Reuler en 2003. Echelle en abscisse correspond aux stades d'application du produit fongicide. Les fongicides appliqués sont : i) Opera (1.5 l/ha) pour les stades GS32 à GS39 et la première demi-dose appliqué au stade GS37 ; ii) Horizon (1l/ha) pour le stade GS59 et la demi-dose GS59. ....	VII-9
1-7- 7 : Variation de l'AUDPC standard au sein des trois dernières feuilles en fonction des traitements en 2003 et résultats de corrélation de l'AUDPC relative de chacun des trois derniers étages foliaires avec le gain de rendement net en kg/ha. ....	VII-9

## PHOTOS

1-7- 1 : Importance de l'Oïdium à Frohmùllen en 2000 sur la variété Ritmo. ....	VII-3
---	-------

## REFERENCES

- AKAI, S. (1952). "Relation of temperature to the invasion of the barley powdery mildew into host." Agriculture & Horticulture **27**: (10) 1135.
- ANDRIVON, D. & C. DE VALLAVIEILLE-POPE (1993). "Racial diversity and complexity in regional populations of *Erysiphe graminis* f.sp.*hordei* in France over a 5-year period." Plant Pathology **42**: 443-464.
- FELSENSTEIN, F. G., E. LIMPET & G. FISCHBECK (1991). Wheat mildew populations in the FRG and neighbouring regions (1986-1988) some aspects of their change. In : JORGENSEN, J.H. Integrated control of cereal mildews : virulence patterns and their change. Roskilde, Denmark. Riso National Laboratory. (pp 1-7).
- GE, Y.-F., J. W. JOHNSON, J. J. ROBERTS & S. RAJARM (1998). "Temperature and resistance gene interactions in the expression of resistance to *Blumeria graminis* f.sp.*tritici*." Euphytica **99**: 103-109.
- JAMES, W. C. (1976). Manual of plant growth stages and diseases assessment keys. Ministry of Agriculture Fisheries. Food. (sans volume).
- MOREAU, J. M. (2004). Lutte contre les maladies en froment, vue côté produits. Fumure et protection phytosanitaire des céréales. Livre blanc. Editeurs responsables : A. Falisse et P. Meeus. Fongicide. pp. 7-12.
- QUINN, J. A. & C. C. POWELL (1985). "Growth and sporulation of oïdium begonia : development of a deterministic model." Annals of Applied Biology **107**: 163-178.
- SHANER, G. & R. E. FINNEY (1977). "The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in knox wheat." Phytopathology **67**: 1051-1056.
- SVEC, M. & M. MIKLOVICOVA (1998). "Structure of populations of wheat powdery mildew (*Erysiphe graminis* DC f.sp. *tritici* Marchal) in Central Europe in 1993-1996 : I. Dynamics of virulence." European Journal of Plant Pathology **104**: 537-544.
- WARD, S. V. & J. G. MANNERS (1974). "Environmental effects on the quantity and viability of conidia produced by *Erysiphe graminis*." Transactions of the British Mycological Society **62**: 119-128.
- WOLFE, M. S. & E. LIMPET (1987). Integrated control of cereal mildews : monitoring the pathogen. Dordrecht. Martinus Nijhoff Publishers. For the Comission European Communities EUR 10842. ISBN 90-247-3626-9. pp. 49-56.
- ZELLER, F. J. & G. FISCHBECK (1992). Cereal Rusts and Mildews. 8<sup>th</sup> European and Mediterranean Cereal Rusts and Mildews Conference. Weihenstephan. Germany. V. Pflanzenzüchtung. **24**. 344 p.
- ZELLER, F. J., L. KONG, L. HARTL, V. MOHLER & S. L. K. HSAM (2002). "Chromosomal location of genes for resistance to powdery mildew in common wheat (*Triticum aestivum* L.em Thell.) 7. Gene Pm29 in line Pova." Euphytica **123**: 187-194.

---

## CHAPITRE VIII

### ETUDE DE L'EFFET DE LA FUMURE AZOTÉE SUR CERTAINES MALADIES CRYPTOGAMIQUES FOLIAIRES ET SUR LE RENDEMENT

---

Les tests réalisés à Everlange en 1999 avec des variations des doses de la fumure azotée pendant trois apports (tallage, 1<sup>er</sup> nœud et dernière feuille) ont révélé des taux de rouille jaune significativement élevé dans les parcelles ayant reçu des doses pleines (100-100-100) par rapport aux parcelles témoins. Pour la septoriose des feuilles causée par *Septoria tritici*, les résultats ne révèlent pas la même tendance que pour la rouille jaune. L'analyse du rendement sur les divers types de fumure azotée a montré que l'apport de l'azote au tallage aboutit à un meilleur rendement que si l'apport est réalisé à un autre stade ( $r^2 = 0.79$  pour une seule fraction ;  $r^2 = 0.75$  pour deux fractions ;  $r^2 = 0.8$  pour trois fractions). Les rendements nets diffèrent significativement ( $P < 0.05$ ) du témoin lorsque la dose de la fumure azotée est appliquée au tallage ou au premier nœud.

---

#### I. Introduction

Une des grandes difficultés de conception de la lutte raisonnée provient de la nécessité de prendre en compte les divers actes techniques qui peuvent influencer l'apparition et la progression de la maladie, et même éventuellement modifier les souches des agents pathogènes. Le choix variétal en est un exemple trivial, mais les interactions avec la fertilisation azotée et les facteurs abiotiques restent peu claires. AYRES (1991) souligne que les stress abiotiques peuvent modifier la réponse des plantes aux pathogènes soit directement, en jouant sur le cycle de développement des parasites, soit indirectement, en jouant sur la tolérance de l'hôte. Par ailleurs, il montre à travers divers exemples que ces interactions peuvent s'exprimer différemment à l'échelle de l'organe, de la plante ou du couvert. A l'échelle du cycle du champignon, TIEDEMANN (1996) a montré que la teneur en azote des feuilles jouait sur la rapidité du cycle et sur l'intensité de la sporulation. Par ailleurs, son étude montre que ces interactions dépendent du champignon, en particulier, de son caractère biotrophe ou nécrotrophe. TALBOT *et al.* (1997) et SNOEIJERS *et al.* (2000) ont montré au niveau génétique que l'expression des symptômes dépendait de la concentration en azote des feuilles. A l'échelle du couvert, la fertilisation azotée a souvent pour conséquence une augmentation des épidémies. SAVARY *et al.* (1995) ont montré que l'impact de la fertilisation azotée sur le développement des épidémies est essentiellement dû à un effet indirect sur la structure du couvert : une augmentation de la densité du couvert accroît les contacts entre feuilles et la durée de mouillage des feuilles.

L'objectif de ce chapitre est de décrire l'effet de l'azote sur l'évolution de certaines maladies cryptogamiques des feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg en 1999.

## II. Matériels et méthodes

En 1999, un plan expérimental a été mis en place par le Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück avec des doses variables d'azote (le plan expérimental est détaillé dans le chapitre II). Toutes les parcelles ont reçu un raccourcisseur Cycocel (0,5 l/ha) appliqué au stade GS31 (20 avril 1999) et un fongicide Allegro (1l/ha) appliqué au stade GS59 (24 mai 1999).

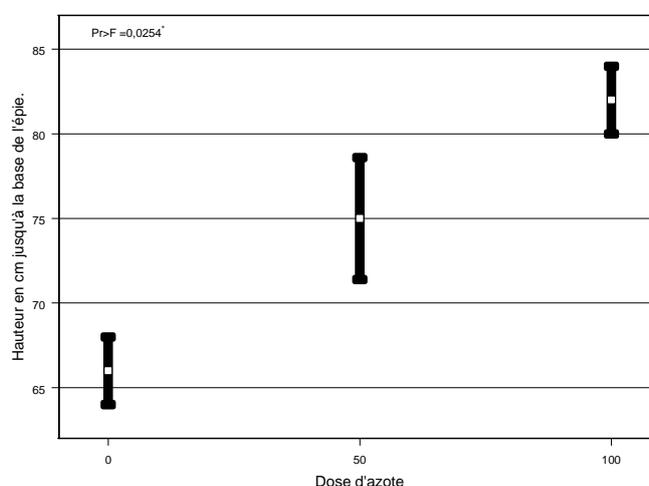
Le critère de comparaison du niveau de la maladie est l'AUDPC (SHANER & FINNEY, 1977). Dans cette étude, seules les maladies les plus importantes seront mentionnées. Des mesures de hauteur de plante jusqu'à la base de l'épi ont été réalisées pendant les observations de 1999.

## III. Résultats

### III.1. Hauteur de la plante

La hauteur de la plante augmente avec la fertilisation azotée (figure 1-8-1). Cette différence par rapport au témoin est significative ( $P < 0,05$ ).

**Figure 1-8- 1 : Variation de la hauteur de la plante jusqu'à la base de l'épi (en cm) de Urban (semée le 9 octobre 1998) pendant les trois mesures faites à Everlange en 1999 (14 juin, 30 juin et 14 juillet) en fonction de la dose azotée.**



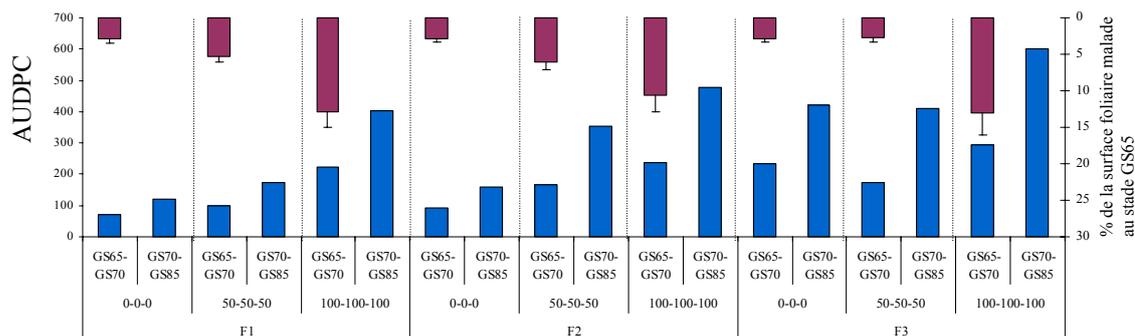
### III.2. Evolution des maladies

#### III.2.1. Rouille jaune

La rouille jaune a connu un développement important à Everlange en 1999. Toutes les parcelles avec différentes doses de fumure azotée ont été attaquées au stade GS65 mais à des degrés variables (figure 1-8-2).

La variation de l'AUDPC en fonction de la fertilisation azotée est très hautement significative ( $P < 0,001$ ) entre GS65 et GS75 pour F1 et F2 ainsi qu'entre GS75 et GS87 pour les trois dernières feuilles (figure 1-8-2). La rouille était significativement élevée dans les parcelles avec la dose (100-100-100) par rapport à celles avec la dose (50-50-50) et à celles qui n'ont reçu aucun traitement fumure.

L'étude de corrélation (tableau 1-8-1) entre la variation de l'AUDPC de F1, F2 et F3 entre GS65 et GS75 ainsi qu'entre GS75 et GS87 en fonction de la variation d'azote (variation de 0 à 100-100-100) donne un ajustement très important.



**Figure 1-8- 2 : Evolution de la rouille jaune à Everlange en 1999 sur les trois feuilles supérieures (F1 est la dernière feuille formée) en fonction de la variation de la fertilisation azotée après traitement fongicide allegro (1l/ha) appliqué au stade GS59.**

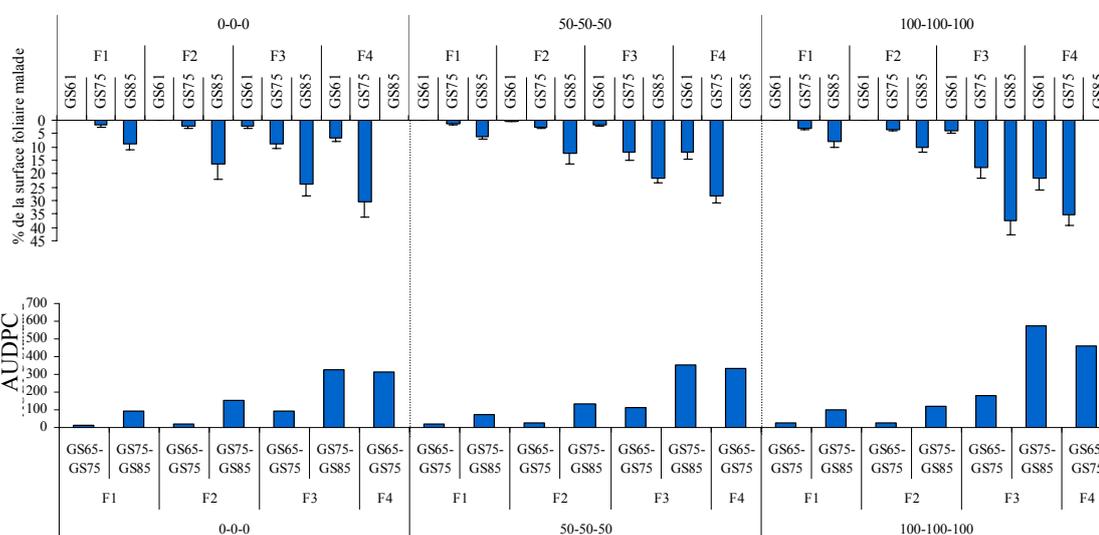
**Tableau 1-8- 1 : Matrice de corrélation entre l’AUDPC de F1, F2 et F3 et la dose d’azote entre GS65 et GS75 ainsi qu’entre GS75 et GS85**

NS : Non significatif ; \* : Significatif ( $P < 0,05$ ) ; \*\* : Hautement significatif ( $P < 0,01$ ) ; \*\*\* : Très hautement significatif ( $P < 0,001$ ).

Stade\Feuille	F1	F2	F3
GS65-GS75	0,94**	1***	0,48 NS
GS75-GS87	0,94**	0,99***	0,85*

### III.2.2. Septoriose des feuilles causée par *Septoria tritici*

La différence entre les doses de fumure azotée se remarque plus nettement sur les feuilles F3 et F4 que sur les feuilles F2 et F1 (figure 1-8-3). Cette différence est visible pour les F4 au stade GS75 et à la fin de la maturité laiteuse pour les F3.



**Figure 1-8- 3 : Variation de la septoriose sur les quatre dernières feuilles en fonction de la dose de la fertilisation azotée après un traitement allegro (1l/ha) réalisé au stade GS59 en 1999.**

L'étude de corrélation entre l’AUDPC de F3 et la variation d’azote a été très important entre GS61 et GS70 ( $r = 0,96$  ;  $P < 0,001$ ) ainsi qu’entre GS75 et GS82 ( $r = 0,91$  ;  $P < 0,001$ ). Lorsque l’analyse de variance a été réalisée sur les quatre derniers étages foliaires, la probabilité est proche de  $\alpha = 0,05$  (juste significative) et non significative pour  $\alpha = 0,01$ . Ceci est dû aux deux dernières feuilles où le niveau de maladie enregistré n’était pas très important.

### III.3. Relation Dose d'azote-Rendement

L'analyse du rendement sur d'autres types de fumures azotées testées avec le rendement net (qx/ha) fait ressortir un certain nombre de points :

- Les rendements nets sont beaucoup plus importants et diffèrent significativement ( $p < 0,05$ ) des rendements nets du témoin lorsque la dose unique de la fumure azotée est appliquée au tallage ou au premier nœud (figure 1-8-4).
- La comparaison du rendement net d'une seule fraction montre que l'apport d'azote au tallage abouti à un meilleur rendement que l'apport aux autres stades seuls (figure 1-8-4).
- Les résultats de corrélations entre le rendement et la variation du moment d'application de deux fractions d'azotes montre que le meilleur rendement correspond à la variante qui a reçu une fraction d'azote au tallage.

En effet, au Grand-Duché de Luxembourg, l'apport d'azote au tallage et au stade de redressement paraît plus intéressant qu'au stade dernière feuille. Les conditions météorologiques hivernales rencontrées au Grand-Duché de Luxembourg sont très rudes par rapport à celles du nord de la région wallonne. La fraction de sortie d'hiver est très importante pour un bon tallage.

## IV. Discussion

La fertilisation azotée influence beaucoup le développement des épidémies de certaines maladies en modifiant soit la structure du couvert, soit l'état physiologique. Dans la plupart des travaux, ces deux processus (structure du couvert et état physiologique) ne peuvent pas être séparés et cela explique certainement pourquoi des effets contradictoires sont souvent observés. Dans le chapitre VII de cette partie, nous avons évoqué l'effet de l'azote sur la variation de l'oïdium dans la Moselle en 2000 et à Reuler en 2003. Cependant, cette maladie n'a pas été observée à Everlange en 1999 même au sein des variétés sensibles telles que Ritmo et Bussard. L'effet de la fumure azotée sur l'oïdium aurait été précisé pour chaque dose si la maladie a été détectée dans ce site.

En 1999, une augmentation du taux de la rouille jaune a été constatée dans les parcelles ayant reçu une forte dose d'azote (100-100-100) par rapport aux parcelles témoins. Cet accroissement de sévérité de la maladie avec de forts apports d'azote a été généralement lié à l'augmentation de la densité de couvert (figure 1-8-1) qui accroît l'humidité relative, la durée d'humectation et les contacts entre les feuilles (TOMPKINS *et al.*, 1993 ; SAVARY *et al.*, 1995). En effet, l'intensification de la densité de surface foliaire permet d'augmenter le nombre de feuilles cibles disponibles pour la dispersion du parasite. De plus, la structure du couvert influence le développement des épidémies car d'une part, elle engendre le microclimat local et donc joue sur les paramètres du cycle et d'autre part, elle détermine la distance entre les organes et influence ainsi la dispersion de la maladie dans le couvert. Cependant, les résultats de la septoriose des feuilles causée par *S. tritici* sur les quatre dernières feuilles ne révèlent pas la même tendance que la rouille jaune sauf pour la F3. La différence de maladie enregistrée sur les feuilles F1 et F2 en fonction de l'augmentation de la fertilisation azotée est non significative ( $P > 0,05$ ). Les travaux de LOVELL *et al.* (1997), constatent que logiquement, la quantité de spores devrait être plus importante dans les parcelles avec de fortes doses d'azote par rapport à celles avec de faibles doses, la différence de sévérité entre les différentes doses est statistiquement non significative. L'augmentation de la densité foliaire favorisée par de forts apports d'azote entraîne une fermeture du couvert végétal qui diminue la pénétration des gouttes de pluie à l'intérieur du couvert, ce qui peut réduire les disséminations se produisant par les éclaboussures.

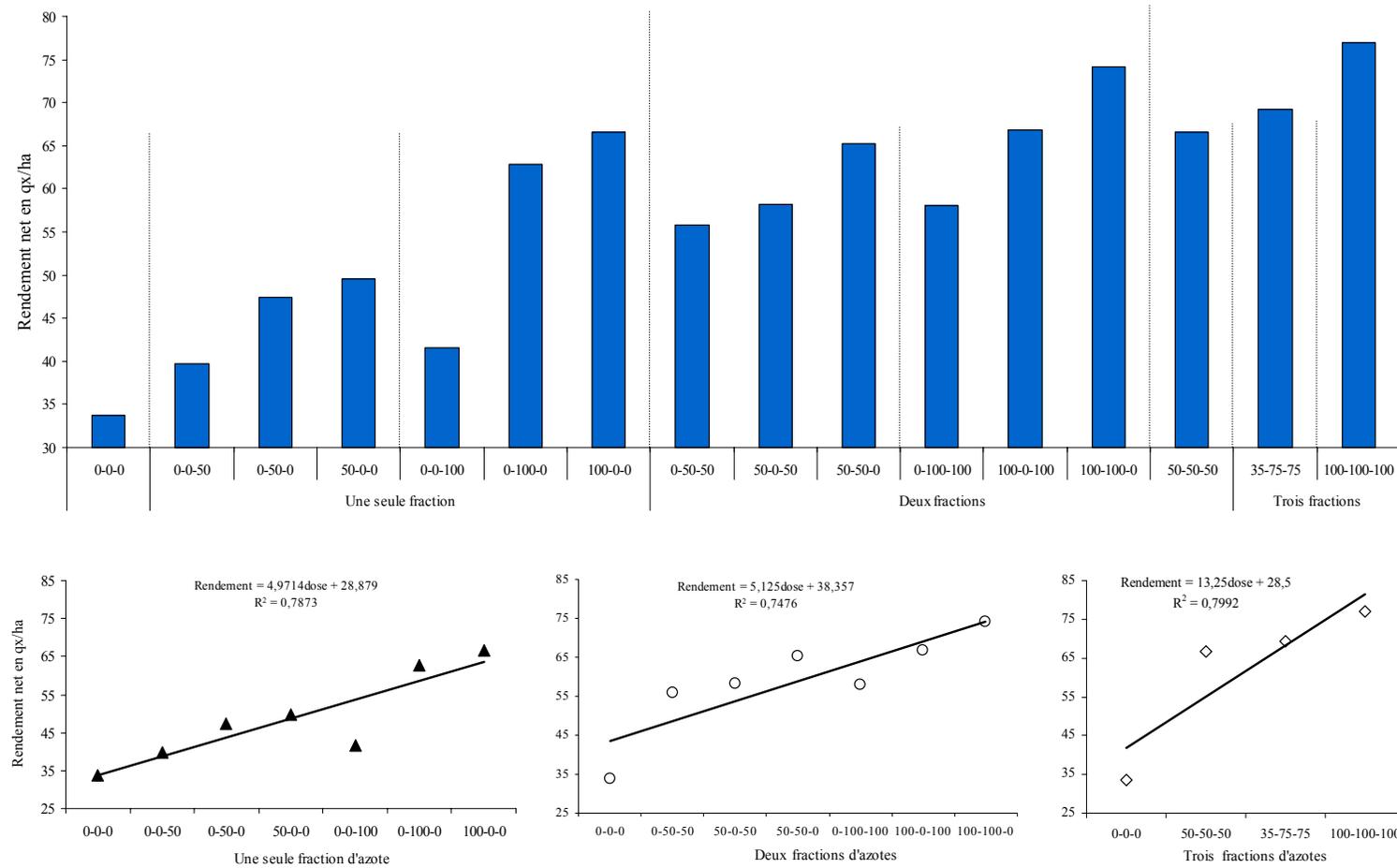


Figure 1-8- 4 : Variation du rendement en qx/ha en fonction des différentes fractions d’azote. Corrélation des différentes doses d’azote avec le rendement net.

EYAL (1981) et DANON *et al.* (1982) révèlent dans leurs études réalisées sur *S. tritici* que le déroulement des épidémies peut être influencé par la taille de la plante hôte. Son développement est lié à la distance des entre-nœuds. Plus la distance entre les feuilles est faible, plus la progression de la septoriose du bas vers le haut du couvert est rapide (BAHAT *et al.*, 1980; LOVELL *et al.*, 1997).

## V. Conclusion

Cette étude a montré l'importance de l'effet prédisposant des apports élevés en azote dans les épidémies de certaines maladies telles que la rouille jaune. Généralement, les modèles utilisés dans la conception de la lutte raisonnée ne prennent pas en compte les apports en azote qui peuvent changer radicalement la nuisibilité et la pression de maladie. Il est indispensable de prendre en considération l'apport en azote dans les modèles qui s'adressent aux complexes parasitaires. Prendre en compte ce facteur permettrait de contribuer à une bonne interprétation de la nuisibilité de certaines maladies cryptogamiques foliaires telles que la rouille jaune.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

1-8- 1 : Matrice de corrélation entre l'AUDPC de F1, F2 et F3 et la dose d'azote entre GS65 et GS75 ainsi qu'entre GS75 et GS85 NS : Non significatif ; * : Significatif (P < 0,05) ; ** : Hautement significatif (P < 0,01) ; *** : Très hautement significatif (P < 0,001).....	VIII-3
--	--------

## FIGURES

1-8- 1 : Variation de la hauteur de la plante jusqu'à la base de l'épi (en cm) de Urban (semée le 9 octobre 1998) pendant les trois mesures faites à Everlange en 1999 (14 juin, 30 juin et 14 juillet) en fonction de la dose azotée.....	VIII-2
1-8- 2 : Evolution de la rouille jaune à Everlange en 1999 sur les trois feuilles supérieures (F1 est la dernière feuille formée) en fonction de la variation de la fertilisation azotée après traitement fongicide allegro (1l/ha) appliqué au stade GS59.....	VIII-3
1-8- 3 : Variation de la septoriose sur les quatre dernières feuilles en fonction de la dose de la fertilisation azotée après un traitement allegro (1l/ha) réalisé au stade GS59 en 1999.....	VIII-3
1-8- 4 : Variation du rendement en qx/ha en fonction des différentes fractions d'azote. Corrélation des différentes doses d'azote avec le rendement net.....	VIII-5

## REFERENCES

- AYRES, P. G. (1991). Growth responses induced by pathogens and other stresses. Responses of plants to multiple stresses. New York. eds H.A. Mooney. W.E. Winner & E.J. Pell. pp. 227-247.
- BAHAT, A., G. HANE, M. B. BROWN & Z. AYAL (1980). "Factors Affecting the vertical Progression of *Septoria* leaf Blotch in short-statured wheats." Ecology and Epidemiology. The American Phytopathological Society **70**: (3) 179-184.
- DANON, T., J. M. SACKS & Z. EYAL (1982). "The relationship among plant sature, maturity class and susceptibility to *Septoria* leaf blotch of wheat." Phytopathology **72**: 1037-1042.
- EYAL, Z. (1981). "Integrated control of *Septoria* diseases of wheat." Plant Dis. **65**: 763-768.
- LOVELL, D. J., S. R. PARKER, T. HUNTER, D. J. ROYLE & R. R. COKER (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.
- SAVARY, S., N. P. CASTILLA, F. A. ELAZEGUI, C. G. MAC LAREN, M. A. YNALVEZ & P. S. TENG (1995). "Direct and indirect effects of nitrogen supply and disease source structure on rice sheath blight spread." Phytopathology **85**: 959-965.
- SHANER, G. & R. E. FINNEY (1977). "The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in knox wheat." Phytopathology **67**: 1051-1056.
- SNOEIJERS, S., A. PEREZ-GARCIA, M. JOOSTEN & P. D. WIT (2000). "The effect of nitrogen on disease development and gene expression in bacterial and fungal plant pathogens." European Journal of Agronomy **106**: 493-506.
- TALBOT, N. J., H. R. K. MAC CAFFERTY, M. MA, K. MOORE & J. E. HAMER (1997). "Nitrogen starvation of the rice blast fungus *Magnaporthe grisea* act as environmental cue for disease symptom expression." Physiological and Molecular Plant Pathology **50**: 179-195.
- TIEDEMANN, A. V. (1996). "Single and combined effects of nitrogen fertilization and ozone on fungal leaf diseases on wheat." J.of Plant Disease and protection **103**: 409-419.
- TOMPKINS, D. K., A. T. WRIGHT & D. B. FOWLER (1993). "Influence of agronomic practices on canopy microclimate and *Septoria* development in no-till winter wheat produced in the Parkland region of Saskatchewan." Canadian J. of Plant Pathology **73**: 331-334.

## **PARTIE II**

- CHAPITRE I : Simulation de la croissance des feuilles en fonction de la somme de degrés jours
- CHAPITRE II : Simulation de la septoriose des feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg
- CHAPITRE III : Evaluation des paramètres météorologiques qui favorisent l'épidémie de la rouille jaune au Grand-Duché de Luxembourg par l'utilisation du modèle de DENNIS (1988)
- CHAPITRE IV : Simulation de la rouille jaune du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg. Calibration et validation
- CHAPITRE V : Analyse conceptuelle des paramètres météorologiques influençant la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg
- CHAPITRE VI : Analyse conceptuelle des composantes microclimatiques

---

## CHAPITRE I

### SIMULATION DE LA CROISSANCE DES FEUILLES EN FONCTION DE LA SOMME DE DÉGRÉS JOURS

---

La simulation de la croissance des feuilles sur base de la somme de degrés jours est indispensable à la mise en place d'un système d'avertissement pour la culture du blé au Grand-Duché de Luxembourg. Cette étude sur la variation du phyllotherme a montré que ce paramètre diffère significativement ( $P < 0.0001$ ) entre les variétés hâtives et les variétés tardives et entre les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1). Ce phyllotherme varie aussi en fonction de la date de semis. Une comparaison entre un semis tardif (6 novembre 2002) et un semis précoce (4 octobre 2002) a montré que le semis tardif contribue à une réduction d'au moins 37 % de la somme de degrés jours à base zéro. La comparaison des proportions des bases 1 à 11 par rapport à la base 0 a montré que la perte du semis tardif par rapport au semis précoce varie entre approximativement 50 % pour les bases 2, 3 et 4 à 100 % pour la base 10. Cette perte importante en somme de degrés jours du semis tardif par rapport au semis précoce a eu pour conséquences une réduction du nombre de feuilles pour le semis tardif.

Enfin, notre étude a révélé que l'émergence d'un nouveau limbe se fait avant que le limbe qui le précède atteigne 100%, généralement à partir de la formation de 75% du limbe précédent. Donc, les nouveaux limbes commencent leur émergence avant le maximum du phyllotherme du limbe précédent. Ce paramètre est très important dans la compréhension de l'évolution de la maladie en fonction des étages foliaires.

---

## I. Introduction

Le développement et la croissance sont deux concepts qui sont souvent employés dans la simulation de la croissance de la culture. Le développement touche à l'âge physiologique de la plante et à sa formation (PENNING DE VRIES *in* WANG *et al.*, 1998). La croissance se réfère à l'augmentation de poids, de volume, de longueur ou de surface de quelques parties ou de toute la plante (RITCHIE & NESMITH, 1991 *in* WANG *et al.*, 1998). La quantité totale de croissance pour un intervalle de temps donné dépend en grande partie de la photosynthèse, tandis que la répartition de l'assimilat entre les différents organes est contrôlée par le stade de développement de la plante. Donc la simulation du développement de la plante est une partie essentielle d'un modèle de la culture.

Pour le blé d'hiver le système de code décimal défini par ZADOKS *et al.*, (1974) a été largement employé pour caractériser les stades de développement de la plante. Ce code correspond à une échelle non linéaire basée sur des états phénologiques irrégulièrement espacés depuis le semis jusqu'à la maturité.

La température et le photopériodisme sont les deux principaux facteurs affectant le taux de développement de la culture. Le stress d'eau peut retarder ou stimuler le développement de la culture, mais un niveau modéré de stress d'eau ne semble avoir aucun effet direct sur le développement de la plante (PENNING DE VRIES *et al.*, 1989 *in* WANG *et al.*, 1998).

Avant l'émergence, la plante grandit sous la surface du sol. Les processus de développement incluent la germination de graine et l'apparition de la première feuille. Après la germination, le taux de développement de la plante ( $R_{dev, emerg}$ ) est contrôlé par la température. Il est simulé par le système de degré jours linéaire avec les pas quotidiens de la température moyenne de l'air (ANGUS *et al.*, 1981).

$$R_{dev, emerg} = (T_{ave} - T_{base}) \times 0.5 / \sum T [day^{-1}] \quad (\text{équation 2-1-1})$$

où  $\Sigma T$  est la somme de température nécessaire pour l'émergence ( $^{\circ}C$  jour).  $T_{ave}$  et  $T_{base}$  sont respectivement la température moyenne journalière de l'air et la température à la base de la culture.  $\Sigma T$  dépend de la profondeur de semis. La simulation de l'émergence des feuilles est possible par une étude du phyllotherme (délai qui sépare l'émergence d'un limbe de l'apparition du limbe suivant). La valeur du phyllotherme ( $\Sigma T$ ) est approximativement constante partout dans la saison de croissance si elle est mesurée en degrés jours (RICKMAN, 1991). Le blé a caractéristiquement un phyllotherme d'environ 100 degrés jours croissants avec une température de base de  $0^{\circ}C$  (KLEPPER *et al.*, 1983; KIRBY *et al.*, 1985). *In* PAVELEY *et al.* (1999), les feuilles émergent approximativement à des intervalles de 110 degrés jours ( $0^{\circ}C$ ) mais vivent approximativement entre 700 et 1000 degrés jours. La valeur de phyllotherme est de 125 degrés jours *in* KANG *et al.* (1998).

La structure de la culture et la position des sources d'inoculum dans celle-ci changent constamment pendant la période de croissance. Par conséquent, l'interprétation de conditions micrométéorologiques seules fournit une information insuffisante pour prévoir l'évolution de l'état sanitaire des feuilles formées ou en formation. Le système Proculture développé par l'Unité de Phytopathologie de l'UCL utilise un phyllotherme constant de 130 degrés jours quelques soit la variété et quelques soit les étages foliaires. Cependant, la réalisation de cette étude sur un couplage du phyllotherme et la période de latence de *S. tritici* se heurte à un ensemble de questions qui sont :

- quel seuil de phyllotherme faut-il prendre pour avoir une simulation de qualité de la croissance des feuilles?
- la valeur seuil du phyllotherme, doit-elle être constante pour toutes les variétés, qu'elles soient hâtives ou tardives ? Faut-il que le phyllotherme reste constant au cours de toute la saison de croissance ou le changer en fonction des étages foliaires ?
- Un semis tardif a-t-il des conséquences sur le nombre de feuilles qui seront formés ?

Cette question de la variation du phyllotherme entre les étages foliaires n'avait jamais été étudiée. Par conséquent, notre premier objectif est d'étudier les variations de ce phyllotherme en fonction de la formation de chacune des trois dernières feuilles pendant les quatre années de recherche entre 2000 et 2003 et de déterminer le Phyllotherme qui sera utilisé dans la simulation de la croissance des feuilles au Grand-Duché de Luxembourg.

## II. Matériels et méthodes

La formation des feuilles a été suivie pendant les 4 années d'observations 2000 à 2003 à Everlange et Reuland et en 2003 à Burmerange, Christnach et Reuler (la méthodologie est développée en détail dans le chapitre II de la première partie). Cette formation des feuilles exprimée en pourcentage a été déterminée pour chacune des variétés (tableau 2-1-1)

**Tableau 2-1- 1 : Variétés qui ont été étudiées selon leur caractère hâtif ou tardif (basé sur la comparaison entre les variétés pour une même date de semis du % de formation des trois dernières feuilles dans les essais et les brochures des sélectionneurs des variétés). Les variétés ont été testées dans des sites différents au Grand-Duché de Luxembourg entre 2000 et 2003.**

Site d'essai	Année	Variétés testées	Précocité
Everlange	2000	Dream	tardive
		Flair	hâtive
	2001	Dream	tardive
		Flair	hâtive
	2002	Achat	tardive
		Drifter	hâtive
2003	Achat	tardive	
Reuland	2000	Dream	tardive
		Flair	hâtive
	2001	Dream	tardive
		Flair	hâtive
Burmerange	2003	Dekan	hâtive
Christnach	2003	Flair	hâtive
Reular	2003	Bussard	hâtive

L'échantillonnage des plantes a été aléatoire et exhaustif. 40 plantes ont été sélectionnées aléatoirement à chaque observation pour chacune des variétés entre le stade plein tallage et l'épiaison. La détermination du classement des feuilles dégagées a été réalisée selon deux méthodes :

- Sur le terrain, 40 plantes ont été aléatoirement marquées et ont servi de référence pour déterminer le moment exact de formation des 5 dernières feuilles et le % de sortie. Cette méthode a été notre méthode de référence ces deux dernières années.
- Pendant les premières années de notre recherche, le moment exact de formation de chacune des feuilles a été réalisé par dissection au laboratoire sur ces 40 plantes choisis aléatoirement. La détermination du % de sortie se fait par la

comparaison de la feuille en formation par rapport à la précédente déjà entièrement formée.

Les stades phénologiques ont été également évalués pour chacune des variétés à chaque observation. Cette évaluation est très difficile pendant le tallage et le début montaison. La meilleure façon de procéder est la dissection des échantillons et le repérage de la position moyenne de l'épi par rapport à la base de la plante ( $< 1\text{cm}$  = tallage,  $1\text{cm}$  = pseudo-redressement,  $>1\text{cm}$  = 1 nœud, ...). Nous avons réalisé la relation entre la formation des trois dernières feuilles et la somme de degrés jours à base zéro en utilisant les stations météorologiques les plus proches des sites d'essais (tableau 2-1-2).

**Tableau 2-1-2 : Stations météorologiques qui ont été utilisées pour les analyses des données d'observations.**

Sites d'essais	Année	Station météorologique	Gestion de la station météorologique
Everlange	2000	Everlange	Lycée Technique Agricole
	2001	Useldange	ASTA
	2002		
	2003		
Reuland	2000	Hersberg	CRP-GL
	2001		
Burmerange	2003	Burmerange	CRP-GL
Christnach	2003	Christnach	CRP-GL
Reuler	2003	Reuler	ASTA

### III. Résultats

#### III.1. Emergence des trois dernières feuilles

Pour illustrer la variation du phyllotherme, nous avons analysé les résultats selon deux cas:

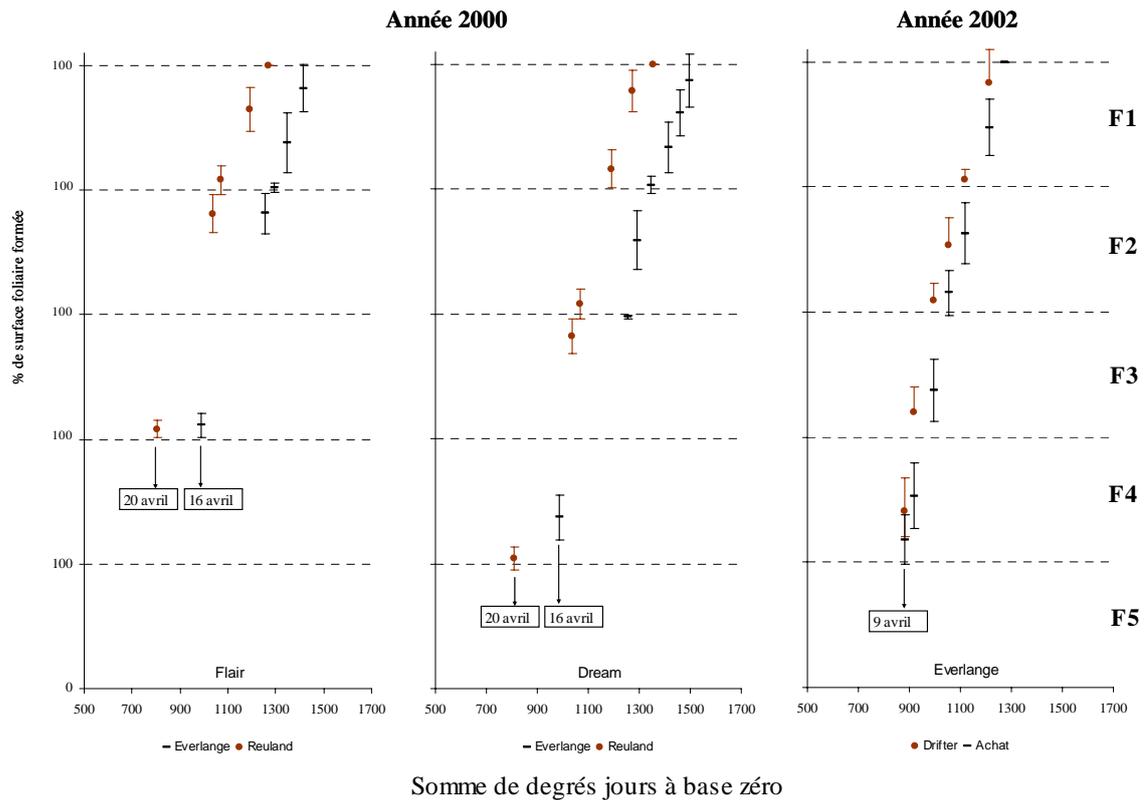
- la population de plantes est approximativement homogène (2000 et 2002) ;
- la population de plante est hétérogène (2001).

##### III.1.1. Cas où la population est homogène.

Entre 2000 et 2001, l'analyse est faite à Everlange et Reuland pour deux variétés, Flair (hâtive), et Dream (tardive). En 2002, cette analyse est faite à Everlange pour Drifter (hâtive) et Achat (tardive). La formation de la feuille F3, nécessite un phyllotherme compris entre 130 et 140 degrés jours pour Flair et atteint 150 degrés jours pour Dream (figure 2-1-1).

Ce phyllotherme était de 140 degrés jours pour F3 d'Achat en 2002 et 128 pour Drifter. Cette étude montre que la valeur du phyllotherme varie avec la variété semée.

Le phyllotherme nécessaire à la formation de la feuille F2 est inférieur à 130 degrés jours et se situe aux alentours de 115 à 125 pour la variété Flair et pourrait être inférieur à 110 degrés jours pour Dream. Ce phyllotherme se situe entre 114 pour Achat et 125 degrés jours pour Drifter.



**Figure 2-1-1 : Variation du phyllotherme en fonction des trois dernières étages foliaires à Everlange et Reuland au niveau de Flair et Dream en 2000, Achat et Drifter à Everlange en 2002. Les dates sur les graphes indiquent le moment où les premières observations ont été réalisées.**

La formation de F1 pour Flair est située entre 115 à Reuland et 123 degrés jours à Everlange. En 2002, le phyllotherme ne dépassait pas 128 degrés jours pour toutes les variétés semées. Ce phyllotherme se situe plutôt dans l'intervalle 110 à 115. L'analyse de régression a montré une excellente relation ( $r^2$  proche de 1) entre la somme de degrés jours à base zéro et le pourcentage de formation des trois dernières étages foliaires de chacune des variétés testées à Everlange et Reuland en 2000 et 2002 (figure 2-1-2).

### III.1.2. Cas où la population est hétérogène.

En 2001, la population de plantes était hétérogène à cause des intempéries hivernales, ce qui a entraîné une diminution du nombre de plants à la sortie d'hiver à Everlange mais surtout à Reuland. Cette grande hétérogénéité entre les plantes ne permet pas de vérifier le phyllotherme nécessaire à la formation des feuilles en se basant sur la moyenne des 40 plantes récoltées. Le phyllotherme résultant qui sera très important ne reflétera pas la réalité de chaque fréquence de feuilles émergentes.

La solution la plus adéquate pour remédier à ce problème est de calculer le phyllotherme moyen des différentes fréquences de populations émergentes pour une variété hâtive, Flair, (figure 2-1-3) et une variété tardive, Dream, (figure 2-1-4).

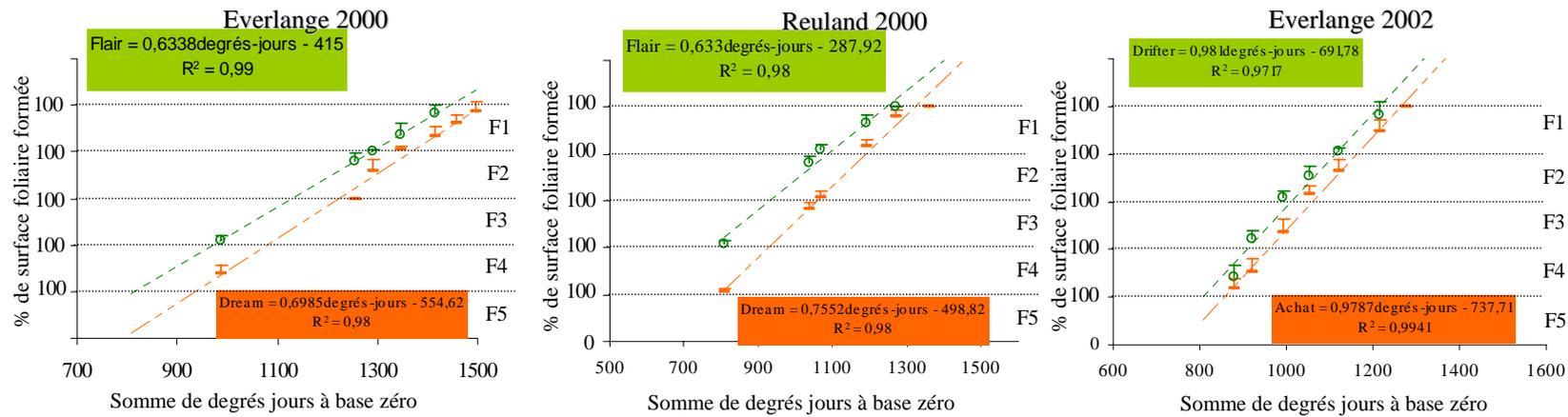
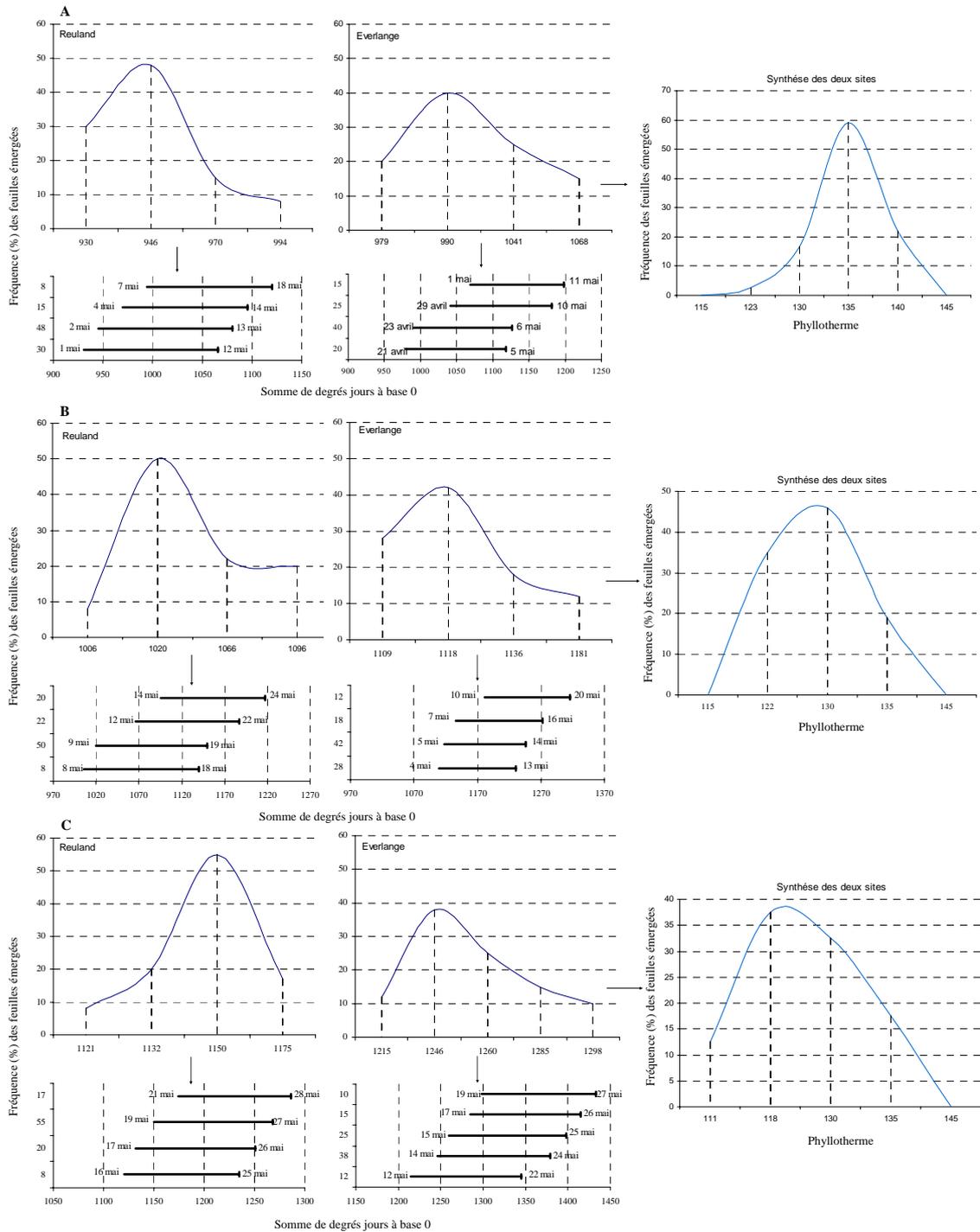


Figure 2-1- 2: Relations entre la somme de degrés jours à base zéro et le pourcentage de surface foliaire formée de Flair et Dream à Everlange et Reuland en 2000 et d’Achat et Drifter à Everlange en 2002.



**Figure 2-1-3 : Variation du phyllotherme au sein de chaque fréquence de feuilles émergentes de Flair à Everlange et Reuland en 2001. A : F3 ; B : F2 ; C : F1. Dans chacun des deux sites, chaque feuille est représentée par deux figures : la première indique la somme de degrés jours à base 0 de chaque fréquence ; la deuxième indique le phyllotherme correspondant à chaque fréquence. Une troisième figure représente les proportions de chaque phyllotherme qui a été enregistré dans les deux sites.**

Il ressort de notre analyse que :

## 1. Flair

- A Everlange, sur 60 % des F3 émergentes, l'écart entre les premiers 20 % et les 40 % qui suivent n'est que de 12 degrés jours. Cependant, l'écart entre les premiers 20 % F3 émergentes et les derniers 15 % formés s'étend à 90 degrés jours soit presque 10 jours. Le phyllotherme moyen calculé pour l'ensemble des fréquences par l'équation 2-1-2 est de 136 degrés jours.

Concernant la F2, sur 70 % des feuilles émergentes, l'écart entre les premiers 28 % et les 42 % qui suivent n'est que de 9 degrés jours. L'écart entre les premiers 28 % F2 émergentes et les derniers 12% formés s'étend à 89 degrés jours soit presque 8 jours. Le phyllotherme moyen calculé pour l'ensemble des fréquences est de 129 degrés jours.

L'écart entre les premiers 12 % F1 formés et les 38% qui s'en suivent est de 16 degrés jours. Cet écart s'étend à 84 degrés jours entre la première fréquence formée (12 %) et les derniers 10 % formés. Le phyllotherme moyen est de 133 degrés jours.

$$\text{Phyllotherme moyen} = \frac{\sum (\text{fréquence} \times \sum \text{deg rés jours})}{100} \quad (\text{éq. 2-1-2})$$

- A Reuland, sur 78 % des F3 émergentes, l'écart entre les premiers 30 % et les 48 % qui suivent est de 15 degrés jours. Mais cet écart s'étend à 64 degrés jours entre les premiers 30 % et les derniers 8 % formés. Le phyllotherme moyen est de 134 degrés jours.

Sur les 58 % des F2 émergentes, l'écart entre les premiers 8 % (figure 2-1-3) formés et les 50 % qui s'en suivent est 14 degrés jours. Mais cet écart est de 90 degrés jours entre les premiers 8 % formés et les derniers 20 % formés. Le phyllotherme moyen est de 127 degrés jours.

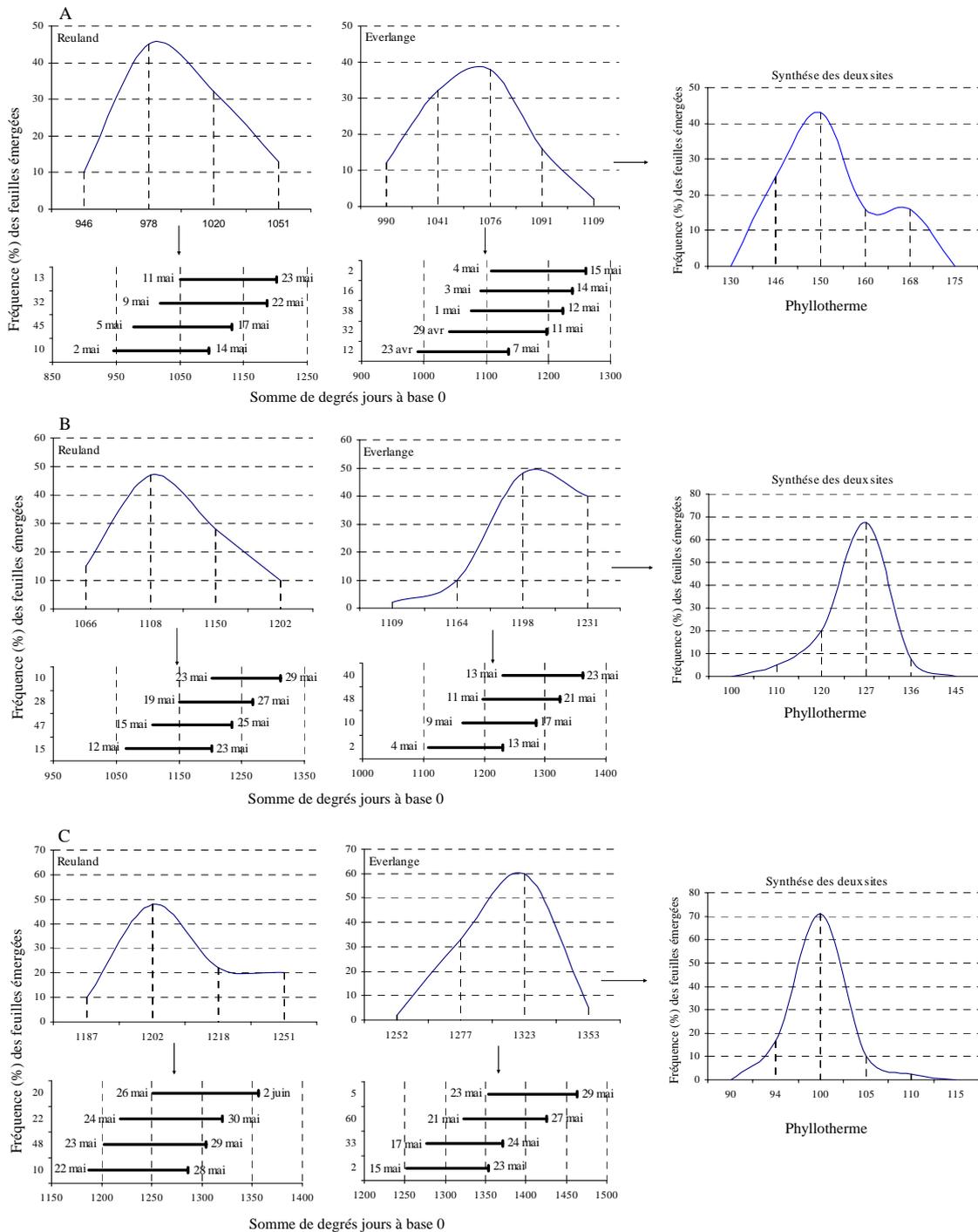
Pour les F1 émergentes, l'écart entre les premiers 8% formées et la fréquence maximale de feuilles émergées (55 %) est de 30 degrés jours. Mais cet écart s'étend à 54 degrés jours entre les premiers 8 % et les derniers 17 % formées. Le phyllotherme moyen est 117 degrés jours.

## 2. Dream

- A Everlange, l'écart entre les premières apparitions de F3 (12 %) et celles qui s'en suivent (figure 2-1-4) est de 51 degrés jours. Cet écart atteint 119 degrés jours entre les premiers 12 % et les dernières fréquences de F3 formées. Le phyllotherme moyen est de 150 degrés jours.

Pour les F2, l'écart entre les premières feuilles émergées et la fréquence maximale de feuilles émergées (48 %) est de 89 degrés jours. Cet écart s'étend à 122 entre les premières feuilles apparues et les dernières feuilles formées (40 %). Le phyllotherme moyen est de 127 degrés jours.

Concernant, les F1, l'écart entre les premières apparitions de la feuille (2 %) et la fréquence maximale de feuilles émergées (60 %) est de 71 degrés jours. Le phyllotherme moyen est de 100 degrés jours.



**Figure 2-1-4 : Variation du phyllotherme au sein de chaque fréquence de feuilles émergentes de Dream à Everlange et Reuland en 2001. A : F3 ; B : F2 ; C : F1. Dans chacun des deux sites, chaque feuille est représenté par deux figures : la première indique la somme de degrés jours à base 0 de chaque fréquence ; la deuxième indique le phyllotherme correspondant à chaque fréquence. Une troisième figure représente les proportions de chaque phyllotherme qui a été enregistré dans les deux sites.**

- A Reuland, l'écart entre les premières apparitions de F3 et le maximum de feuilles émergées (58 %) est de 32 degrés jours. Cet écart s'étend à 105 degrés jours entre les premiers et les dernières apparitions de F3. Le phyllotherme moyen est de 158 degrés jours.

Concernant les F2, l'écart entre les premières apparitions de F2 et le maximum de feuilles émergées est de 42 degrés jours. Cet écart atteint 136 degrés jours entre les premières apparitions et les dernières feuilles formées. Le phyllotherme moyen est de 124 degrés jours.

L'écart entre les premiers 10 % F1 et le maximum de feuilles émergées (70 %) est de 15 degrés jours. Cet écart s'étend à 64 degrés jours entre les premières apparitions et les derniers 20 % formés. Le phyllotherme moyen est de 102 degrés jours.

### 3. Synthèse

Une étude synthèse a été faite dans les deux sites pour déterminer le phyllotherme principal qui a été enregistré pour chaque feuille pour deux types de variétés (hâtive et tardive).

Ainsi, la F3 de la variété hâtive a besoin d'un phyllotherme principal de 135 degrés jours. Ce phyllotherme a été enregistré dans 59 % des cas. Cependant, la F3 de la variété tardive a besoin d'un phyllotherme principal beaucoup plus important que la variété hâtive. Ce phyllotherme principal correspond à 150 degrés jours. Il a été enregistré dans plus de 43 % des cas.

La F2 de la variété hâtive a besoin d'un phyllotherme principal de 130 degrés jours qui a été enregistré dans 46 % des cas. Cependant, dans 35 % de la population émergente, le phyllotherme principal correspond à 122 degrés jours. La variation du phyllotherme entre la F3 et la F2 de la variété hâtive est presque négligeable mais pour une variété tardive comme Dream cette variation est très importante. Ce phyllotherme principal de Dream passe de 150 degrés jours (43 %) à 127 degrés jours (68 %).

Le phyllotherme principal de la F1 de la variété hâtive est situé entre 118 degrés jours (38 %) et 130 degrés jours (33 %). Cette variation du phyllotherme de cette variété est presque négligeable par rapport à la variété tardive pour laquelle le phyllotherme principal passe de 127 degrés jours pour la F2 à 100 degrés jours pour la F1. La formation des deux dernières feuilles de Dream nécessite une somme de degrés jours moins de 227 degrés jours alors que la F3 nécessite à elle seule 150 degrés jours.

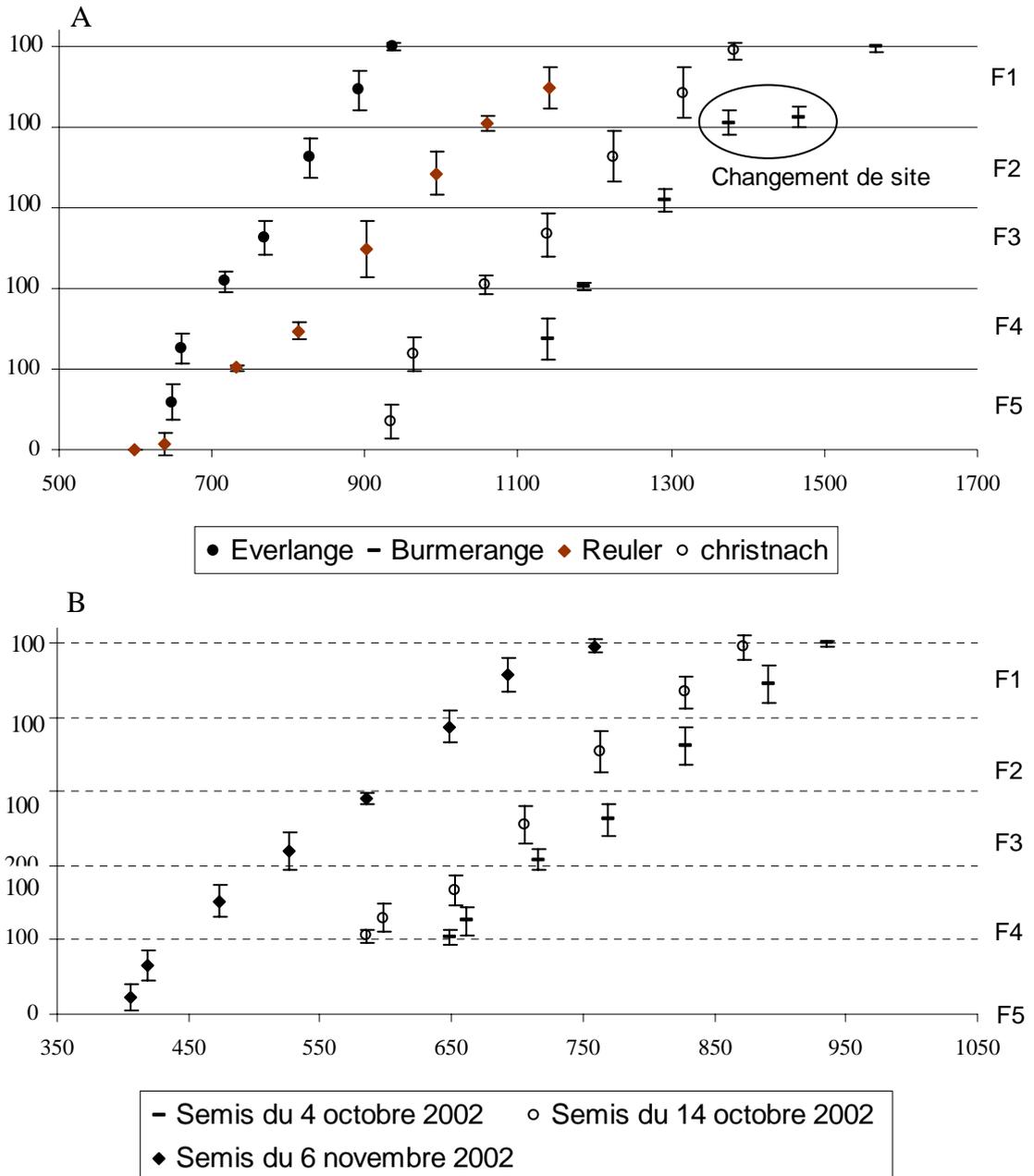
En somme, la variation du phyllotherme entre les étages foliaires est plus contrastée dans le cas des variétés tardives que des variétés hâtives.

#### **III.2. Variation de l'émergence des feuilles en fonction des sites d'essai et de la date de semis.**

La formation des feuilles était tardive à Reuland par rapport à Everlange en 2000 et 2001 lorsque la comparaison se base sur la date d'observation. Cependant, lorsque la

comparaison se base sur le nombre de degrés jours à base 0°C, Reuland paraît en avance par rapport à Everlange. Parmi les hypothèses plausibles nous pouvons citer :

- Le microclimat lié à un site agit efficacement sur le développement de la plante ;
- La variation du tallage entre variétés ;
- La différence de date de semis entre les sites agit sur le nombre de talles et le nombre de feuilles qui seront formées.



**Figure 2-1-5 : Variation de la formation des 5 dernières feuilles en fonction de la somme de degrés jours A : dans les 4 sites d'essais en 2003. B : en fonction de trois dates de semis à Everlange pour la variété Achat. La première observation correspond au 7 avril.**

En 2000, l'écart de semis entre Everlange (15 octobre) et celui de Reuland (18 octobre) n'est que de 3 jours. Mais, en fonction de la somme de degrés jours à base 0°C, la formation des feuilles est très en avance à Reuland par rapport à Everlange. Afin d'approfondir cette question, nous avons analysé les données récoltées en 2003 dans le

---

cadre du Projet SINTAMA coordonné par la Cellule CREBS du CRP-Gabriel Lippmann.

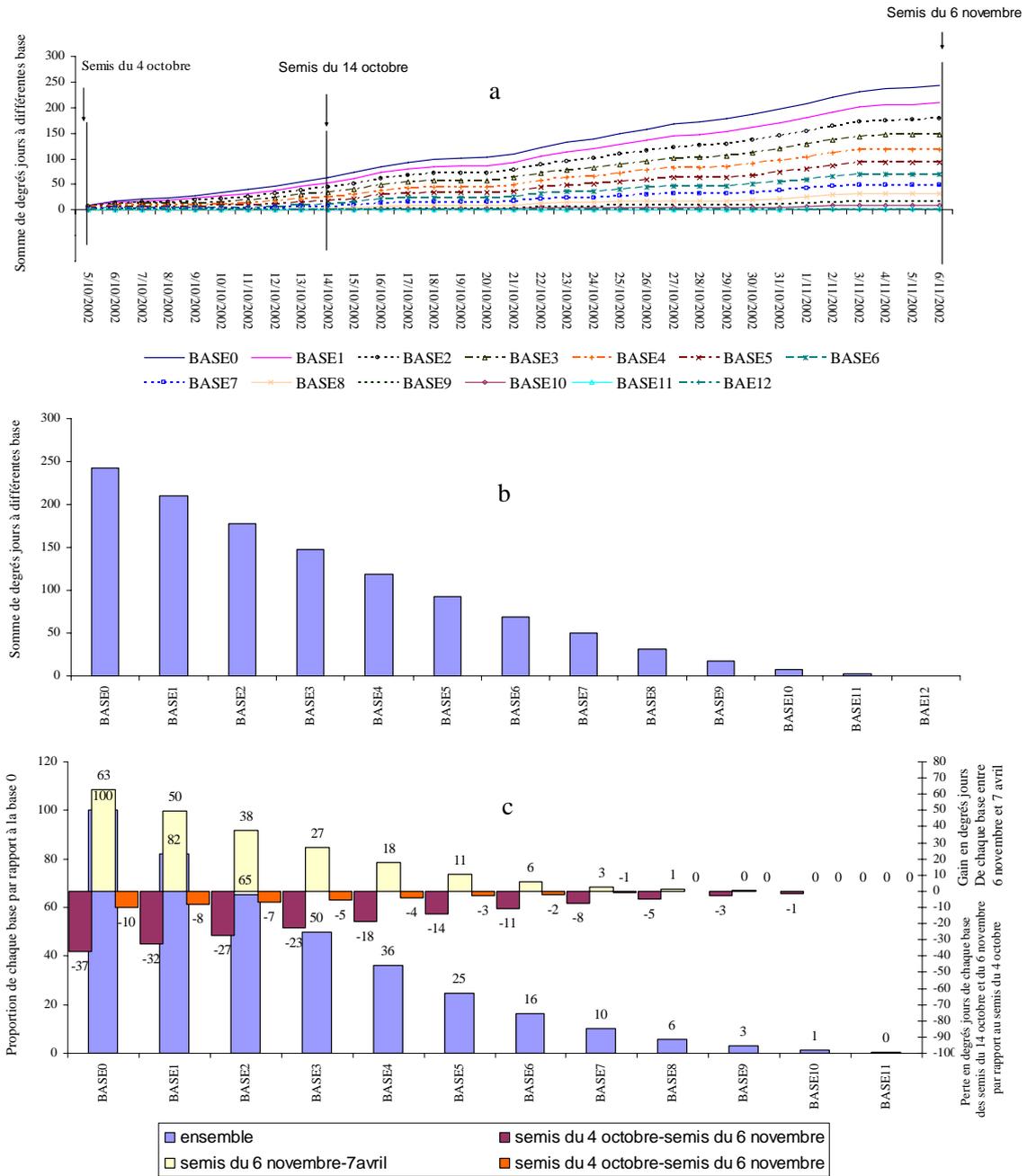
Les résultats de cette analyse (figure 2-1-5 A), montrent que Burmerange situé dans la Moselle luxembourgeoise est le site le plus tardif lorsque la comparaison se base sur la somme de degrés jours alors que les premières apparitions des feuilles sont enregistrées dans ce site lorsque la comparaison se base sur la date d'observation. Reuler paraît parmi les sites les plus hâtifs lorsque la comparaison se base sur la somme de degrés jours alors que ce site est le plus tardif lorsque la comparaison se base sur la date d'observation. La somme de degrés jours à base zéro sous-évalue le développement phénologique, d'autres facteurs interviennent telles que la date de semis, les degrés jours à des bases supérieures à zéro et le photopériodisme. Les conditions microclimatiques de chaque site agissent sur le tallage et le nombre de feuilles qui seront formées mais ceux-ci sont modulés par la date de semis. Pour illustrer l'importance de la date de semis dans la variation du nombre de talles et les feuilles qui seront formées, nous avons analysé l'émergence des 5 dernières feuilles en fonction de la somme de degrés jours dans le même site (Everlange) et pour la même variété (Achat) mais avec trois dates de semis différentes, 4 octobre 2002, 14 octobre 2002 et 6 novembre 2002 (figure 2-1-5 B).

Les résultats de cette analyse montrent que l'apparition des 5 dernières feuilles a nécessité moins de degrés jours pour le semis du 6 novembre par rapport au semis du 4 octobre et le semis du 14 octobre par rapport au semis du 6 novembre. Même constatation lorsque nous comparons l'apparition des 5 dernières feuilles entre le semis du 6 novembre et le semis du 14 octobre. Pour comprendre ce phénomène, nous avons jugé qu'il est indispensable d'analyser pendant la période qui sépare les trois semis les températures à différentes bases (0, 1, 2, ...). Nous avons essayé de déterminer la base qui donne un cumul de zéro degrés jours entre le semis du 4 octobre et les deux semis du 14 octobre et 6 novembre afin de déceler toutes les bases qui ont eu lieu pendant cette période. Ensuite, nous avons calculé la fréquence de chaque base par rapport à la base 0 pendant trois périodes: a) entre le semis du 4 octobre et le semis du 14 octobre; b) entre le semis du 4 octobre et le semis du 6 novembre; c) entre le semis du 6 novembre et la date de la première observation effectuée sur le terrain (7 avril).

C'est la température à base 12 entre le 4 octobre et le 6 novembre 2002 qui permet au semis du 4 octobre d'atteindre au 7 avril la même somme de degrés jours que le semis du 6 novembre (figure 2-1-6 a). Mais entre le 4 octobre et le 6 novembre, le semis du 6 novembre a perdu 243 degrés jours à base 0 (figure 2-1-6 b) qui correspond à une perte de 37 %. Cette perte est de 210 degrés jours pour la température à base 1 soit 32 % sur 82 % représenté par cette base. Cette perte est de 50 % de la température à base 4 sur 36 % représenté par cette base. La perte est supérieure à 50 % sur l'effectif représenté par des températures à des bases plus grand que 4. La base 9 et 10 ne sont présentes que pendant la période séparant ces semis.

Ces résultats montrent que le semis du 6 novembre et dans une moindre mesure le semis du 14 octobre ont perdu des températures très favorables à la germination et au levé (température supérieure à 6°C) qui ont été pratiquement inexistantes pendant la période hivernale. De plus l'apparition des 5 dernières feuilles du semis du 6 novembre à des sommes de degrés jours beaucoup plus inférieures à celles du semis du 4 octobre révèle que le semis du 6 novembre a réduit des étapes de la phénologie correspondant à un phyllotherme de base 0 supérieure à 243 degrés jours soit la durée de presque deux

phyllochromes. Donc un semis tardif aboutit à une réduction de certaines étapes de la phénologie probablement le nombre de feuilles qui seront formées.



**Figure 2-1-6 : Variation de la somme de degrés jours entre trois semis. a : somme de degrés jours entre les trois semis à différentes bases jusqu'à ce que la somme soit égale à 0. b : Somme de degrés jours représenté par chaque base présente pendant la période séparant les trois semis. c : Gain (%) de chaque base en degrés jours entre le 6 novembre et 7 avril et perte (%) en degrés jours des semis B et C par rapport au semis A.**

#### IV. Discussion

Le Phyllotherme diffère significativement ( $P < 0,0001$ ) entre les variétés hâtives et les variétés tardives et entre les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1). En effet, notre analyse a montré que les feuilles F3 nécessitent plus de degrés jours. Ce phyllotherme est supérieur ou égal à 130 degrés jours mais ne dépasse pas 140 degrés jours pour les

variétés hâtives. Par contre il pourrait atteindre 150 degrés jours pour les variétés tardives telles que Dream et aux alentours de 140 degrés jours pour les variétés à développement intermédiaire (Achat).

Les deux dernières feuilles surtout la dernière nécessitent beaucoup moins de degrés jours pour leur formation surtout les variétés tardives telles que Dream et Achat. Le nombre de degrés jours ne dépasse pas 110 degrés jours et se situe souvent dans l'intervalle entre 90 et 100 degrés jours pour Dream. Donc, la valeur du phyllotherme devrait être modifié dans le logiciel Proculture lorsque les deux dernières feuilles commencent à sortir pour minimiser la somme des carrés des erreurs de précision de la simulation. En plus cette étude a montré que la F3 est la référence la plus indispensable pour toute simulation de la croissance des feuilles. Notre analyse a montré que les 5 dernières feuilles apparaissent plus tôt dans le cas du semis tardif que les semis précoces.

La solution à ce problème est de programmer dans le logiciel Proculture un phyllotherme moyen de 135 pour F3 des variétés hâtives et de 140 à 145 pour celles qui sont tardives. Pour la F2, 127 degrés jours paraissent une valeur idéale à prendre en considération puisque le phyllotherme qui a été enregistré au sein de la plupart des variétés scille entre 124 à 128. Un phyllotherme de 134 degrés jours n'a été enregistré qu'une seule fois pour toute la période d'observation. En effet, la probabilité pour que la F2 ait un phyllotherme de 130 ou légèrement supérieur à 130 degrés jours ne dépasse pas 9 % pour toutes les variétés et dans l'ensemble des sites pendant les 4 années d'observations. Alors que cette probabilité est supérieure à 90 % pour les phyllothermes situés entre 124 et 128 degrés jours.

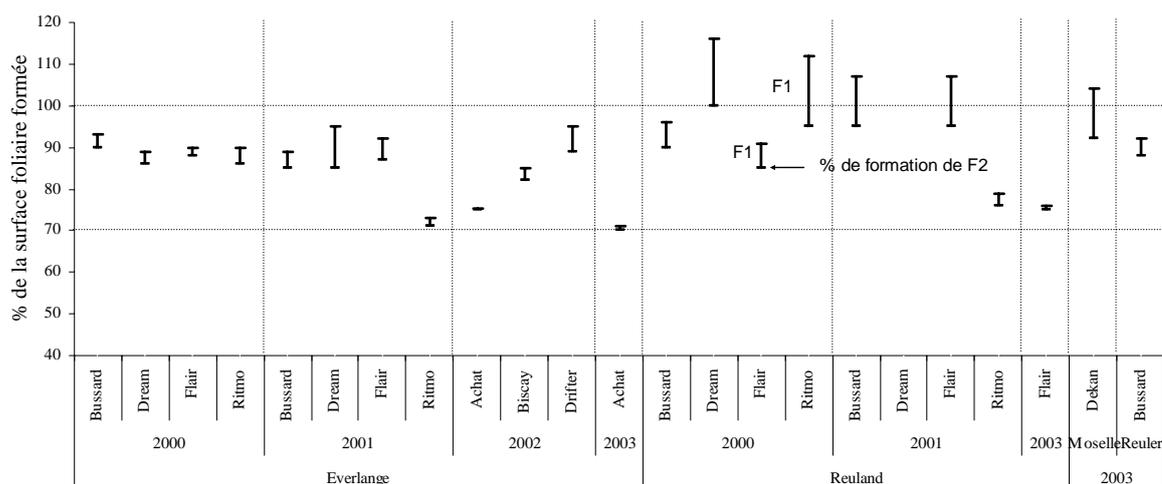
La probabilité pour que la F1 ait un phyllotherme de 130 degrés jours ne dépasse pas 9 % et pour que ce phyllotherme soit inférieur à 110 degrés jours, cette probabilité est supérieure à 80 %.

Dans la simulation de la croissance des feuilles surtout les trois dernières feuilles, le phyllochrome programmé présente la durée entre la première apparition de la feuille et la formation complète. Pourtant, les analyses de nos observations montrent que l'émergence de la nouvelle feuille située au-dessus commence avant que celle qui la précède n'achève sa formation complète.

Souvent la nouvelle feuille commence à émerger lorsque celle qui la précède est entre 80 et 90 % (figure 2-1-7).

Donc, il est indispensable d'enregistrer que les feuilles nouvellement formées apparaissent souvent avant que les feuilles qui les précèdent achèvent complètement leur croissance (l'intervalle de précision est de 2 à 5 jours avant que la feuille précédente soit formée complètement). Cette dernière idée n'a jamais été signalée dans la littérature et constitue une des originalités de ce travail.

Ces constatations sont très importantes dans les simulations du couplage du module de croissance avec les périodes d'infections.



**Figure 2-1-7 : Ecart entre la formation de F2 et la F1 qui commence à émerger pendant les 4 années d'observation. Les barres représentent le % de formation de F1 et la base des barres représente le degré de formation de F2 au même moment.**

Selon, SHAW et ROYLE (1986), les feuilles apparaissent typiquement chaque 10 jours pendant le printemps et la tige s'étend de 20 cm par semaine vers le haut pendant l'apparition des trois dernières feuilles. Le transport de l'inoculum des feuilles inférieures aux feuilles supérieures de la culture est un facteur de limitation dans les épidémies de *S. tritici* parce qu'il dépend fortement du stade et de l'architecture de la plante pendant la formation des 5 dernières feuilles mais aussi des conditions d'infection pendant la formation de ces feuilles. Ainsi, si la maladie devait devenir sévère sur les feuilles supérieures, elles devraient être infectées très tôt au cours de leur formation (SHAW & ROYLE, 1993).

Ainsi, selon SHAW *et al.*, (1993), les effets d'amplification de très petites différences de dans les dates d'apparition des 3 dernières feuilles signifient que ceci devrait être pris en compte pour une prédiction précise et efficace: Avec des averses sporadiques, deux cultures qui diffèrent seulement de 2 ou 3 jours dans le développement des 3 dernières feuilles peuvent avoir des quantités finales de la maladie très différentes. Deux mécanismes peuvent contribuer à cela:

1. Si les pluies intenses favorables à un déplacement important de spores dans la culture sont sporadiques. Le temps de la première infection des deux cultures ou les parties de celles ci pourrait différer beaucoup plus par la différence du temps dans le développement de la culture. Supposons qu'une partie de la culture atteigne GS37, 2 jours en avance par rapport à l'autre partie. Les éclaboussures n'ont eu lieu que le premier jour et pas pendant 3 autres semaines et pendant cette pluie, le bout de la dernière feuille (F1) apparaît dans la partie la plus avancée de la culture. Une seconde pluie permettrait ainsi la multiplication substantielle de la nécrose sur la dernière feuille de la partie avancée de la culture, mais causerait seulement quelques lésions primaires sur la partie légèrement postérieure.
2. Une jeune feuille pourrait être facilement infectée à son émergence parce que les spores y sont transférées par les éclaboussures par contact physique avec les feuilles inférieures. La quantité de spores déplacées vers les feuilles supérieures est fonction des éclaboussures dont l'efficacité diminue avec chaque augmentation de 10 cm de la hauteur de la plante (SHAW, 1987). La distance

verticale entre les sources d'inoculum et les feuilles en formation sont indispensables à la modélisation de *S. tritici*.

## V. CONCLUSION

Il ressort de cette étude sur la croissance des feuilles que le phyllotherme, terme essentiel à prendre en considération pour la simulation, dépend fortement des variétés et de la date de semis. La valeur du phyllotherme est plus élevée pour les feuilles F3 que pour les deux dernières feuilles. Ainsi, nous suggérons de prendre dans la simulation de la croissance de F3 un phyllotherme de 135 degrés jours pour les variétés hâtives et entre 140 à 145 pour les variétés tardives. Pour la F2, l'idéal est de prendre un phyllotherme de 127 degrés jours et pour la F1 un phyllotherme situé entre 120 et 130 degrés jours pour les variétés hâtives. Ce phyllotherme correspond à 100 degrés jours pour la F1 de la variété Dream (variété tardive). Cette étude a montré aussi que les nouvelles feuilles apparaissent avant que celles qui les précèdent n'atteignent leur formation finale. Ces nouvelles feuilles émergent souvent quelques jours avant que le phyllochrome de la feuille qui la précède n'atteigne son niveau maximum. Ceci est très important pour l'analyse du couplage du module de croissance avec les périodes d'infections.

En plus notre étude a montré que la date de semis influence le nombre de feuilles qui seront formées. Plus le semis est tardif, plus le nombre de thalles sera réduit. Il est très important de réaliser la simulation en prenant comme référence la F3 qui permet de mieux recalibrer la phénologie. Le microclimat de chaque site en relation avec sa topologie influence aussi la croissance de la plante en relation avec la date de semis. Burmerange est un site caractérisé par la douceur de la température et le semis a été réalisé au début d'octobre mais en fonction de degrés jours ce site apparaît plus tardif par rapport aux autres sites. D'où l'intérêt d'une étude topoclimatique de chaque région climatique. Néanmoins, certains points sont jugés importants à développer :

- Une estimation complète de la phénologie de la plante (racines, tiges, feuilles, allongements des entre nœuds, ...) et ceci pour deux raisons :
  - la réalisation d'une étude de croissance complète de la plante permettrait une étude approfondie du phyllochrome (WEIR *et al.*, 1984 ; RICKMAN *et al.*, 1985) ;
  - Cette estimation étendrait le champ d'étude plus à l'épidémie d'autres parasites du blé d'hiver (piétin-verse) ;
- La fumure azotée joue un rôle important dans la croissance de la plante et influence la phyllotherme. Cependant, dans cette étude l'aspect azote ainsi que le photopériodisme n'ont pas été pris en compte. Il convient de souligner que les doses totales d'azotes appliquées dans les différents sites d'essai ne diffèrent pas énormément. Donc, cette étude reflète sur les pratiques agricoles appliquées au Grand-Duché de Luxembourg. Pour le photopériodisme, nous estimons qu'avec la température qui est mesuré par un grand nombre de stations météorologiques nous ciblerons avec une grande précision la formation des feuilles.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

- 2-1-1 : Variétés qui ont été étudiées selon leur caractère hâtif ou tardif (basé sur la comparaison entre les variétés pour une même date de semis du % de formation des trois dernières feuilles dans les essais et les brochures des sélectionneurs des variétés). Les variétés ont été testées dans des sites différents au Grand-Duché de Luxembourg entre 2000 et 2003. ....I-3
- 2-1-2 : Stations météorologiques qui ont été utilisées pour les analyses des données d'observations. ....I-4

## FIGURES

- 2-1-1 : Variation du phyllotherme en fonction des trois dernières étages foliaires à Everlange et Reuland au niveau de Flair et Dream en 2000, Achat et Drifter à Everlange en 2002. Les dates sur les graphes indiquent le moment où les premières observations ont été réalisées. ....I-5
- 2-1-2 : Relations entre la somme de degrés jours à base zéro et le pourcentage de surface foliaire formée de Flair et Dream à Everlange et Reuland en 2000 et d'Achat et Drifter à Everlange en 2002. ....I-6
- 2-1-3 : Variation du phyllotherme au sein de chaque fréquence de feuilles émergentes de Flair à Everlange et Reuland en 2001. A : F3 ; B : F2 ; C : F1. Dans chacun des deux sites, chaque feuille est représentée par deux figures : la première indique la somme de degrés jours à base 0 de chaque fréquence ; la deuxième indique le phyllotherme correspondant à chaque fréquence. Une troisième figure représente les proportions de chaque phyllotherme qui a été enregistré dans les deux sites. ....I-7
- 2-1-4 : Variation du phyllotherme au sein de chaque fréquence de feuilles émergentes de Dream à Everlange et Reuland en 2001. A : F3 ; B : F2 ; C : F1. Dans chacun des deux sites, chaque feuille est représenté par deux figures : la première indique la somme de degrés jours à base 0 de chaque fréquence ; la deuxième indique le phyllotherme correspondant à chaque fréquence. Une troisième figure représente les proportions de chaque phyllotherme qui a été enregistré dans les deux sites. ....I-9
- 2-1-5 : Variation de la formation des 5 dernières feuilles en fonction de la somme de degrés jours A : dans les 4 sites d'essais en 2003. B : en fonction de trois dates de semis à Everlange pour la variété Achat. La première observation correspond au 7 avril. ....I-11
- 2-1-6 : Variation de la somme de degrés jours entre trois semis. a : somme de degrés jours entre les trois semis à différentes bases jusqu'à ce que la somme soit égale à 0. b : Somme de degrés jours représenté par chaque base présente pendant la période séparant les trois semis. c : Gain (%) de chaque base en degrés jours entre le 6 novembre et 7 avril et perte (%) en degrés jours des semis B et C par rapport au semis A. ....I-13
- 2-1-7 : Ecart entre la formation de F2 et la F1 qui commence à émerger pendant les 4 années d'observation. Les barres représentent le % de formation de F1 et la base des barres représente le degré de formation de F2 au même moment. ....I-15

## REFERENCES

- ANGUS, J. F., R. B. CUNNINGHAM, M. W. MONCUR & D. H. MAC KENZIE (1981). "Phasic development in field crops. I. Thermal response in the seedling phase." *Field Crops Research* **3**: 365-378.
- KANG, M. S. (1998). "Using genotype by environment interaction for crop cultivar development." *Adv. Agron.* **62**: 199-252.
- KIRBY, J. M., M. APPELYARD & G. FELLOWS (1985). "Leaf emergence and tillering in barley and wheat." *Agronomie* **5**: 193-2000.
- KLEPPER, B., R. W. RICKMAN & R. K. BETFORT (1983). "Leaf and tiller identification on wheat plant crop." *Sci.* **23**: 1002-1004.
- PAVELEY, N. D., Ed. (1999). *Integrating Septoria Risk Variables. Septoria on Cereals: a study of Pathosystems*. London. CABI Publishing CAB International 351 p. ISBN 0-85199-269-2.
- RICKMAN, R. W., B. KLEPPER & R. K. BELFORD (1985). Developmental relationships among roots, leaves and tillers in winter wheat. In wheat growth and modeling. E. W. R. K. ATKIN. Nato Asi. Ser. A. **86**. 406 p.
- SHAW, M. W. (1987). "Assessment of upward movement of rain splash using a fluorescent tracer method and its application to the epidemiology of cereal pathogens." *Plant Pathology* **36**: 201-213.
- SHAW, M. W. & D. J. ROYLE (1986). *Saving Septoria fungicide sprays : the use of disease forecasts*. British Crop Protection Conference - Pest and Diseases. pp. 1193-1200.
- SHAW, M. W. & D. J. ROYLE (1993). "Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) on winter wheat in the U.K." *Plant Pathology* **42**: 882-899.
- WANG, E. & T. ENGEL (1998). "Simulation of phenological development of wheat crops." *Agricultural Systems* **58(1)**: 1-24.
- WEIR, A. H., P. L. BRAGG, J. R. PORTER & J. H. RAYNER (1984). "A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations." *J. Agric. Sci.* **102**: 371-382.
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG & C. F. KONZAK (1974). "A decimal code for the growth stages of cereals weeds." *Research* **14**: 415-421.

---

**CHAPITRE II****SIMULATION DE LA SEPTORIOSE DES FEUILLES DU BLÉ D’HIVER AU  
GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG**Calibration, Adaptation et Validation de Proculture

---

La septoriose des feuilles causée par *Mycosphaerella graminicola* [FUCKEL, SCHROETER] mieux connu par son anamorphe *Septoria tritici* [ROBBINS & DESMAZIÈRES] est la principale maladie foliaire affectant la culture du blé d’hiver au Grand-Duché de Luxembourg. Le champignon peut causer des dommages très importants durant la phase de remplissage du grain et conduire ainsi à des pertes très importantes de rendement. La gestion de *S. tritici* vise la protection de l’infection des trois dernières feuilles qui sont les principales feuilles qui contribuent au grossissement des grains.

Le modèle « Proculture » 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 couplage du module de maladie et du module de croissance permet la simulation du développement de la maladie à l’échelle parcellaire.

Le modèle de simulation prévoit les infections primaires et secondaires exprimées et celles en latence à condition que les données d’entrée concernant l’apparition de la feuille soient correctes.

La calibration et la validation du modèle « Proculture » ont été réalisées pendant les années 2000 à 2002. Cette calibration a été faite selon les conditions météorologiques luxembourgeoises mais aussi selon les conditions culturales de ce pays (variétés différentes, date de semis, fumure, labour et sans labour, ...). Avec un pourcentage de réussite oscillant entre 85 % et 95 %, le modèle Proculture semble être une plate forme indispensable pour une agriculture de précision à l’échelle parcellaire au Grand-Duché de Luxembourg.

---

**I. Introduction**

Les produits chimiques utilisés dans la protection de la septoriose des feuilles du blé d’hiver au Grand-Duché de Luxembourg sont chers. Leur utilisation fréquente accélère l’apparition de souches pathogènes résistantes aux traitements. Pour ces raisons, le cahier des charges de l’agriculteur évolue rapidement. Il devient donc urgent de développer des stratégies plus raisonnables et plus respectueuses de l’environnement qui permettent de guider l’agriculteur luxembourgeois à mieux gérer sa culture. La gestion de *Septoria tritici* doit se baser sur deux modules :

- le 1<sup>er</sup> décrit les cycles infectieux primaires (la germination, la latence et la sporulation à partir d’une infection) en relation avec la croissance des feuilles ;
- le 2<sup>ème</sup> module simule la dispersion des spores dans le couvert.

Le premier module comprend deux sous modules, la période infectieuse et le module de croissance. Pour l’élaboration du modèle épidémiologique du complexe foliaire, l’étude de la bibliographie a permis d’estimer que l’effet du climat sur l’épidémie de la septoriose avait déjà été largement étudié. En revanche, les effets de l’hôte sur le développement de la maladie avaient été très peu explorés, tant dans les phénomènes de

dispersion que dans le développement du cycle à l'échelle foliaire. De plus, des informations manquent pour la quantification de l'inoculum primaire et la simulation de la forme téléomorphe *Mycosphaerella graminicola*. C'est pourtant indispensable afin d'aboutir à un modèle épidémiologique complet par étage foliaire, échelle pertinente pour introduire les fonctions de nuisibilité. La simulation de la maladie consiste à comprendre la dynamique de population des deux formes (téléomorphe et anamorphe) de la septoriose des feuilles et l'importance de chaque facteur biotique (structural, architectural, génétique, ...), abiotique (climat, pente, position, ...) dans l'évolution en gradient de l'épidémie.

### **I.1. Comparaison de la forme téléomorphe et anamorphe**

Des études récentes ont démontré que l'inoculum ne provient pas exclusivement sous forme de conidie à partir des résidus de la culture précédente comme précédemment pensé, mais aussi sous forme d'ascospores produits sur les feuilles infectées de la culture en cours (KEMA & SILFHOUT, 1996 ; HUNTER *et al.*, 1999). Des études menées aux Etats-Unis (CHEN & MAC DONALD, 1996) suggèrent que les ascospores contribuent ensemble avec les pycnidiospores au développement épidémique de *S. tritici*. Cependant, ces études n'ont pas fourni d'information sur la taille de la contribution relative des ascospores comparées avec les pycnidiospores au développement épidémique. La comparaison de l'importance relative des ascospores et des pycnidiospores pendant une épidémie de *S. tritici* est compliquée parce que les paramètres épidémiologiques pour les deux phases du champignon sont différents. Ainsi, la période de latence est considérablement plus longue pour la forme téléomorphe que pour la forme anamorphe (KEMA *et al.*, 1996 ; HUNTER *et al.*, 1999 ; ERIKSEN, 2000 ; *in* ERIKSEN *et al.*, 2001). Les ascospores peuvent être dispersées par les éclaboussures limitées à l'environnement immédiat de leur libération (SHAW & ROYLE, 1989 ; SHAW & ROYLE, 1993). Cependant, les évaluations s'étendent de 4000 à plus de 20000 spores par pycnidium selon les paramètres environnementaux et la variété cultivée (EYAL, 1971 ; GOUGH, 1978). Un pseudothecium ne contient que quelques centaines de spores (ERIKSEN *et al.*, 2001). Les ascospores pourraient avoir un avantage sur les pycnidiospores du fait que leur dispersion pourrait arriver même pendant des périodes relativement sèches où la dispersion de pycnidiospores est limitée.

La question qui s'impose est la suivante : quelle est l'influence des ascospores de *M. graminicola* sur l'évolution épidémiologique de *S. tritici* pendant la période montaison du blé d'hiver ? Selon ERIKSEN *et al.* (2001), les ascospores ont une influence négligeable sur le développement épidémique pendant la phase montaison à cause de leur plus longue période de latence et l'efficacité de multiplication qui est inférieure pour *Pseudothecia* comparé avec les pycnides. Ceci est dû aux mécanismes de dispersion différents pour les ascospores et les pycnidiospores. De plus, les ascospores sont aéroportées, par conséquent, une haute proportion d'ascospores libérées peut être perdue sur le terrain. La forme téléomorphe a une capacité de production de spores limitée comparée avec la forme anamorphe. A la fin de la saison, le potentiel des spores issues de la forme téléomorphe augmente rapidement pour de nouvelles infections. Seulement, une grande proportion de ces ascospores sera perdue parce que la surface foliaire saine disponible pour l'infection est insuffisante (sénescence durant la saison) et parce que la période de latence est si longue pour que les symptômes apparaissent seulement autour de la moisson.

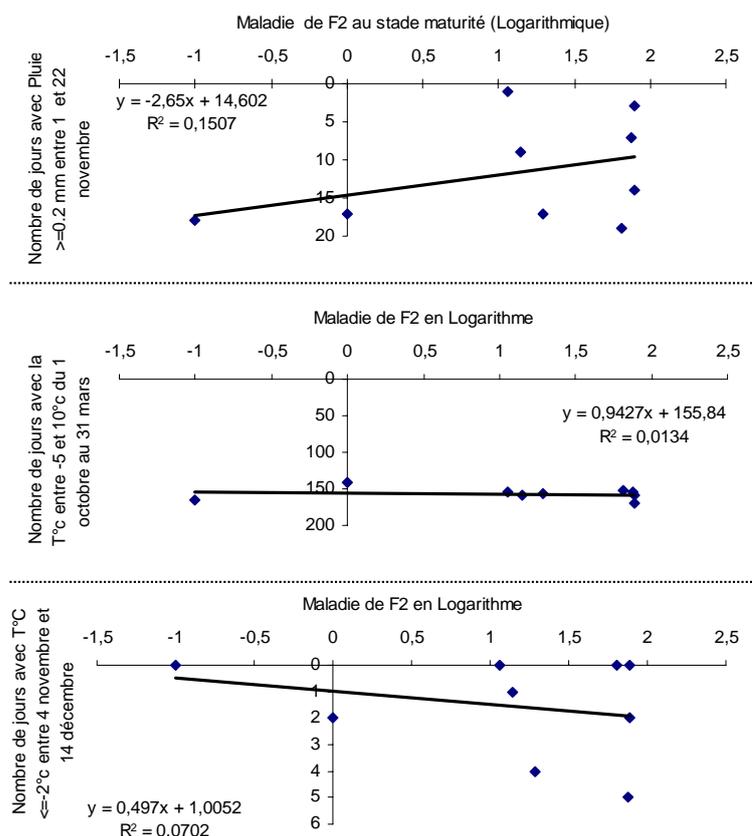
## I.2. Evolution en gradient de l'épidémie

La majorité des systèmes de prévision proposés pour la gestion de *S. tritici* supposent que le risque principal d'infection des feuilles supérieures vient d'inoculum qui s'est développé sur les feuilles pendant l'hiver et le printemps avant l'extension de la tige (HANSEN *et al.*, 1994). Ces systèmes sont basés uniquement sur la pluie arrivant pendant l'extension de la tige, sans prendre en considération le développement des différentes feuilles (TYLDESLEY & THOMPSON, 1980 ; COAKLEY *et al.*, 1985 ; THOMAS *et al.*, 1989 ; MURRAY *et al.*, 1990). SHAW & ROYLE (1993) suggèrent que l'inoculum au stade GS31 (ZADOKS *et al.*, 1974) est seulement un guide partiel de l'inoculum disponible pendant l'expansion de F2 et F1. La croissance des feuilles, l'architecture de la plante et la variété constituent les moteurs de l'évolution en gradient de *S. tritici* en fonction des conditions météorologiques (TAVELLA, 1978 ; BAHAT *et al.*, 1980 ; SHAW & ROYLE, 1986 ; SHAW, 1987 ; SHAW, 1991 ; SHAW & ROYLE, 1993 ; ROYLE, 1994 ; LOVELL *et al.*, 1997). La progression de la maladie sur les feuilles supérieures est déterminée par la coïncidence de la période d'infection pendant et juste après la sortie de ces feuilles, la sensibilité de la culture (ROYLE, 1991) et probablement les effets de compétition avec d'autres maladies qui peuvent accélérer la croissance du pathogène (MEHDIZADEGAN & GOUGH, 1987). Les mécanismes par lesquels la population du pathogène se multiplie sur les feuilles supérieures sont déterminés par l'interaction de la croissance de la plante, les conditions météorologiques permettant le mouvement de l'inoculum pour une nouvelle infection et la disponibilité d'inoculum près de ces feuilles (SHAW & ROYLE, 1993). Si les feuilles supérieures sont infectées tôt dans leur vie, elles vont probablement subir des dégâts beaucoup plus sévères pour deux raisons : a) l'existence d'un temps suffisant pour avoir plus qu'un cycle de multiplication sur la surface foliaire de ces feuilles et un temps plus long pendant lequel la diffusion et l'infection peuvent arriver et mener toujours à la perte prématurée de la surface foliaire ; b) ces feuilles sont plus proches des sources de l'inoculum et les éclaboussures extrêmes ne seront pas nécessaires pour déplacer un nombre de spores équivalent sur un tissu susceptible. Néanmoins, la structure de la culture et la position de la source de l'inoculum changent constamment et ainsi, le risque de progression de maladie est dynamiquement complexe et spécifique à chaque année cultural (LOVELL *et al.*, 1997). De plus, la durée de vie des feuilles supérieures est considérablement raccourcie par des infections secondaires résultantes de l'inoculum produit par des lésions primaires dans la même couche de feuille (SHAW & ROYLE, 1993). En plus, des paramètres évoqués ci-dessus, la maladie pourrait atteindre très tôt les trois dernières feuilles en fonction des distances entre les feuilles consécutives (BAHAT *et al.*, 1980), le temps de chevauchement de feuilles et l'extension de la tige (LOVELL *et al.*, 1997). Ces mécanismes de transfert horizontaux et verticaux de l'inoculum constituent probablement deux facteurs critiques à la progression de la maladie. Seulement, ce transfert horizontal n'est pas représenté directement dans les systèmes de prévision de *S. tritici*. L'objectif de ce travail est de calibrer et valider la plate forme Proculture en fonction des conditions météorologiques et les paramètres culturaux du Grand-Duché de Luxembourg.

## II. Etat de la modélisation de *S. tritici*

Les conditions météorologiques sont le leitmotiv du cycle épidémique de *S. tritici*. L'analyse des conditions météorologiques favorisant l'évolution de *S. tritici* s'avère indispensable pour la simulation de cette maladie. Pour la période hivernale, nous avons analysé la corrélation existante entre d'une part le taux de maladie de F2 pendant la maturité exprimé en logarithme et d'autre part ; a) le nombre de jours avec pluie

supérieure à 0.2 mm entre le 1<sup>er</sup> novembre et 22 novembre (PARKER *et al.*, 1998) ; b) le nombre de jours avec la température comprise entre - 5 et 10°C du 1<sup>er</sup> octobre au 31 mars ; c) le nombre de jours avec la température inférieure à - 2°C entre 4 novembre et 14 décembre (PARKER *et al.*, 1998) (figure 2-2-1). L'objectif de cette analyse est de tenter d'estimer le potentiel d'inoculum primaire. Cependant, les résultats de cette corrélation montrent la complexité d'estimer le potentiel d'inoculum primaire pendant la période hivernale. Ce sont surtout les conditions météorologiques pendant la montaison qui agissent sur la sévérité de *S. tritici* (ROYLE *et al.*, 1986 ; SHAW & ROYLE, 1986 ; POLLEY & THOMAS, 1991 ; SHAW & ROYLE, 1993).

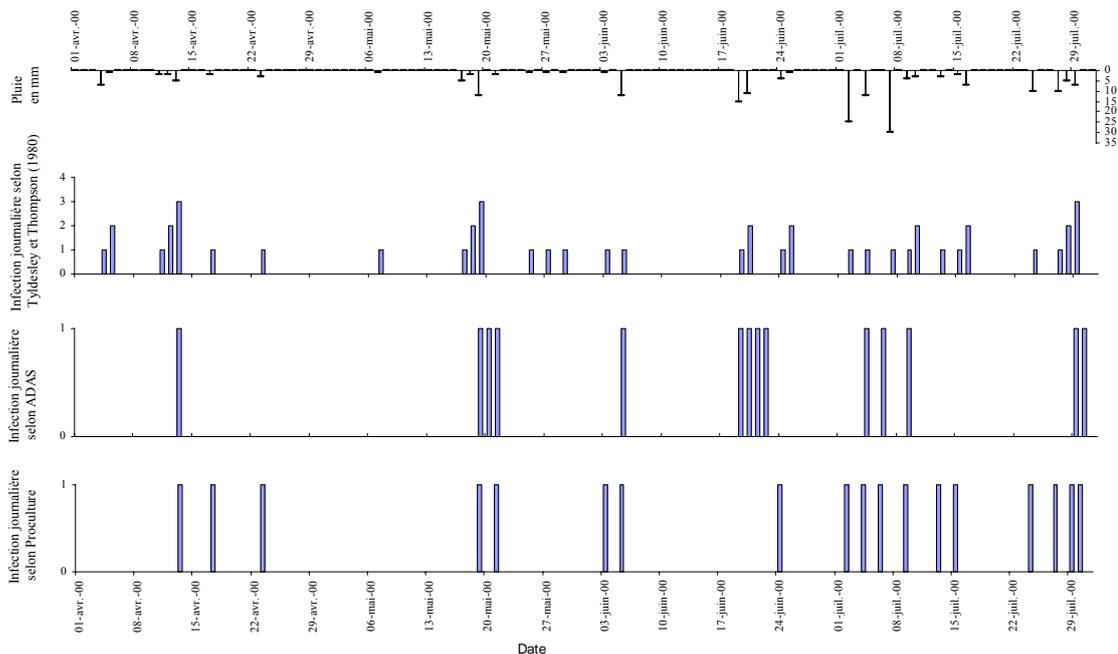


**Figure 2-2- 1 : Résultats de corrélation entre les conditions météorologiques hivernales des années 2000, 2001 et 2003 et le niveau de maladie sur la F2 pendant la maturité laiteuse exprimée en logarithme dans trois sites d'essai (Everlange, Reuland et Moselle).**

Ainsi, nous avons comparé les facteurs météorologiques évoqués dans la littérature qui agissent sur la septoriose pendant le printemps (tableau 2-2-1). Pour le seuil minimal de température à prendre pour l'infection, nous jugeons que 7°C est trop élevé lorsque l'objectif fixé au départ est de déceler toutes les périodes d'infections possibles. Avec Proculture, certaines périodes d'infections ont échappé à la simulation lorsque le seuil minimal de température était de 5°C pendant 48 heures (CALAY *et al.*, 2002). Cependant, de nombreux modèles négligent les périodes d'interruption de la température ou de l'humidité alors que c'est un élément indispensable dans la modélisation. Selon SHAW (1991), les ruptures des périodes à 75 % d'humidité relative pendant 48 heures ont réduit légèrement le processus d'infection mais des ruptures à 50 % d'humidité relative ont de grands effets mais permettent pourtant encore à l'infection de se produire. Pour simuler l'infection, certains modèles prennent des conditions journalières (ADAS et TYLDESLEY & THOMPSON, 1980), d'autres se basent sur des conditions horaires (Proculture, ...). Nous avons comparé les modèles ADAS, TYLDESLEY & THOMPSON (1980) et Proculture (figure 2-2-2).

**Tableau 2-2- 1 : Tableau synthétique de la littérature des conditions météorologiques favorisant l'infection de *S. tritici*. Les conditions de Proculture sont mentionnées par MOREAU & MARAITE (1999) et CALAY *et al.*, (2002). Les chiffres () représentent le nombre de jours. Min/minimale ; Opt/optimale ; Max/ maximale ; Int/intensité ; h/heure.**

	Lumière			Température en °C			Humidité			Pluie		Auteur
	Min	Opt	Max	Ambiante	durée	Max de maladie	Int (mm)	Période				
-	-	18	25	oui	48 h	-	-	-	-	WEBER (1922)		
-	7 (2)	-	25	-	-	-	-	-	-	RENFRO et YOUNG (1956)		
oui	-	-	-	oui	-	-	-	-	-	FELLOWS (1962) ; BENEDICT (1971)		
-	-	22 à 24	-	oui	12 h	24 h à 96 h	-	-	-	SHIPTON <i>et al.</i> , (1971)		
-	2	-	37	oui	-	-	-	-	-	GHEORGHIES (1974)		
-	-	-	-	oui	15 h	-	-	-	-	HOLMES et COLHOUN (1974)		
-	-	-	-	oui	-	-	>=1	jours	-	TYLDESLEY et THOMPSON (1980)		
-	10	16 à 19	25	oui	48	24 h à 96 h	-	-	-	MAGHBOUL <i>et al.</i> , (1992)		
-	-	-	-	>=90%	>=1 jour	-	>=10	2 (3) pluie 1 <sup>er</sup> jour	-			
-	-	-	-	>=90%	>=1 jour	-	>=5	3 jours	-	ADAS		
-	-	-	-	>=90%	>=1 jour	-	oui	4 jours	-			
-	5 (2)	-	-	>=60%	19 h	-	0.1/1 <sup>ère</sup> h ; 0.5/2 <sup>ème</sup> h	-	-	MOREAU et MARAITE (1999)		
-	4 (2)	-	-	>=60%	19 h	-	0.1/1 <sup>ère</sup> h ; 0.5/2 <sup>ème</sup> h	-	-	CALAY <i>et al.</i> , (2001)		



**Figure 2-2-2 : Comparaison des simulations de l'infection des modèles TYLDESLEY & THOMPSON (1980), ADAS et Proculture. Station météorologique d'Everlange (2000).**

Les résultats de cette comparaison entre les trois modèles montrent une certaine similitude entre ADAS et Proculture. Cependant, le nombre de périodes d'infection paraît plus important avec Proculture qu'avec ADAS. Ceci s'explique par le fait que Proculture fonctionne à l'échelle horaire, ces exigences de pluie ne sont pas très importantes, il suffit de 0.1mm pendant la première heure pour préparer les pycnides et 0.5 mm pendant la deuxième heure pour disperser par des éclaboussures les conidies produits par ces pycnides. Alors qu'ADAS est très exigeant pour la pluie. Cette exigence

permet de sélectionner les principales périodes d'infections mais négligent certaines périodes où la pluie est très faible mais avec des périodes humides très importantes. Pour le modèle de TYLDESLEY & THOMPSON (1980), son seuil de pluie journalière fixé à 1mm pourrait dévoiler toutes périodes d'infection mais un grand nombre de ces périodes ne sont pas efficaces du fait que les seuils de tolérance de la température et de l'humidité peuvent être dépassés. D'où l'importance de simuler les moments d'infection à l'échelle horaire comme c'est le cas dans Proculture.

Pour la latence, le système Proculture utilise l'équation polynomiale (variété sensible) développée par SHAW (1990). Nous avons analysé les limites de sensibilité de ce modèle pour déterminer les seuils de température qui agissent sur ce modèle (figure 2-2-3 A). Cette étude a permis de dégager trois classes de températures : a) des températures entre - 10 et 0°C, dans cette gamme de température, le modèle de latence est souvent négatif, ce qui implique que 100% de la  $\Sigma 1/P$  (somme de l'inverse de la latence) serait quasi impossible à atteindre (une longue période de latence pendant l'hiver) ; b) températures entre 0 et 26°C, le modèle est souvent positif mais les températures les plus propices à la latence se situent entre 8 et 20°C avec un maximum entre 18 et 20°C (températures enregistrées pendant les phases critiques du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg). c) températures entre 26 et 33°C, la latence devient de plus en plus longue au fur et à mesure que la température tend vers 33°C.

La première apparition de nouvelles pycnides est déterminée par le cumul de  $1/p$  jusqu'à ce que la somme cumulée atteigne 100% (RAPILLY, 1992 ; MOREAU & MARAITE, 1999). Ce qui importe dans notre simulation est de caractériser le

pathochrome par le rapport  $\frac{\left( \begin{array}{c} \text{période} \\ \text{de} \\ \text{latence} \end{array} \right)}{\text{phyllochrome}}$ . Ce rapport fournit la relation entre le

phyllochrome et la période de latence pour chacun des limbes qui apparaissent successivement (figure 2-2-3 B). Cette composante est déjà intégrée dans Proculture par le développement d'un algorithme permettant le couplage d'un module de croissance basé sur un phyllochrome principale (130 degrés jours à base 0°C) et la période de latence (MOREAU & MARAITE, 2000). Ceci constitue une grande originalité de Proculture par rapport aux systèmes d'avertissement(s) classiques<sup>1</sup> (Proplant en Allemagne, Epipré en Hollande, Persept en France).

<sup>1</sup> Une comparaison entre les systèmes d'avertissements existant dans les pays limitrophes a été développée lors de l'introduction générale de cette thèse.

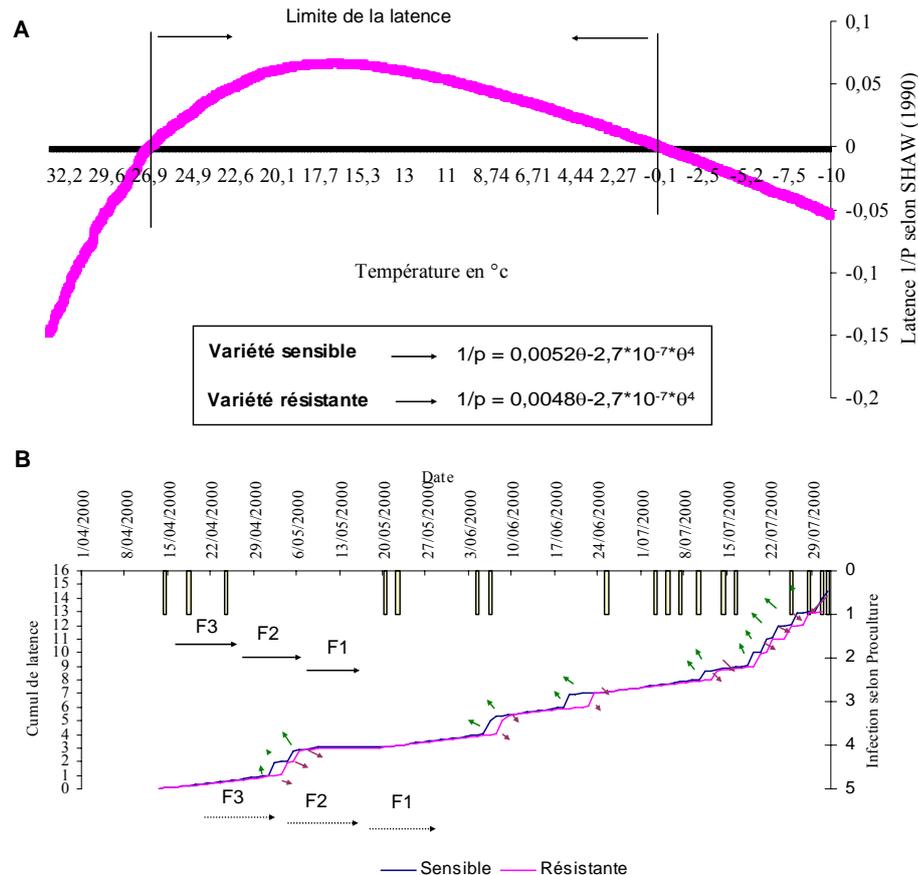


Figure 2-2-3 : La latence selon SHAW (1990). A/ Les limites du modèle concernant le paramètre température. B/ Cumul de la latence en fonction de deux équations (variétés sensible et résistante) pour chaque infection. Les petites flèches vertes représentent la fin de la latence pour les variétés sensibles et celles en violet représentent la fin de la latence pour les variétés résistantes. Les flèches avec une ligne continue représentent le début de la formation des trois dernières feuilles de Bussard (sensible) et celles en lignes discontinues représentent le début de la formation des trois dernières feuilles de Dream (résistante).

### III. Matériels et méthodes

La méthodologie concernant le suivi des essais entre 2000 et 2003 est développée en détail dans le chapitre I et II de la première partie de cette thèse. Les données météorologiques ont été fournies par l'ASTA, le Lycée Technique Agricole et la Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies du Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann.

Etant donné l'approche mécanistique de Proculture par rapport à celle stochastique des autres systèmes d'avertissement (Epiré, Persept ...), la simulation de la formation des feuilles par Proculture qui le démarque des autres systèmes, nous avons opté pour ce système pour le tester et le calibrer pour la culture du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg.

Pour son fonctionnement, le programme Proculture se base sur des données abiotiques et biotiques. Les données abiotiques correspondent principalement aux données météorologiques horaires de la station la plus proche de la variété suivie. Cependant, les données biotiques sont spécifiques à chaque variété et correspondent aux données suivantes : i) la date de semis, référence indispensable pour démarrer la somme de degrés jours ; ii) les stades phénologiques observées et le numéro ainsi que le pourcentage de la feuille formée pour le recalage de la phénologie.

### III.1. Modélisation du transfert d'inoculum

Le système Proculture considère que les feuilles F5 et F4 sont toujours assez basses et peuvent être atteintes par l'inoculum des feuilles inférieures alors que F3 peut être infectée mais seulement selon certaines conditions :

Si l'infection est exprimée sur les feuilles F4, F5, et F3 est en formation, cette feuille peut être atteinte très probablement par F4 et moins par F5 ;

La F2 est infectée si les infections sont déjà exprimées sur F3 et F4 et si F2 est en formation, la F1 est infectée si et seulement si les infections sont exprimées sur F2 et F3 (MOREAU & MARAITE, 1999).

### III.2. Les sorties du modèle Proculture

Les outputs de « PROCULTURE » se présentent en deux catégories :

1. soit un dessin de la plante du blé d'hiver représentant l'état actuel de la culture et son état dans 15 à 20 jours destiné surtout au simple utilisateur (figure 2-2-4).

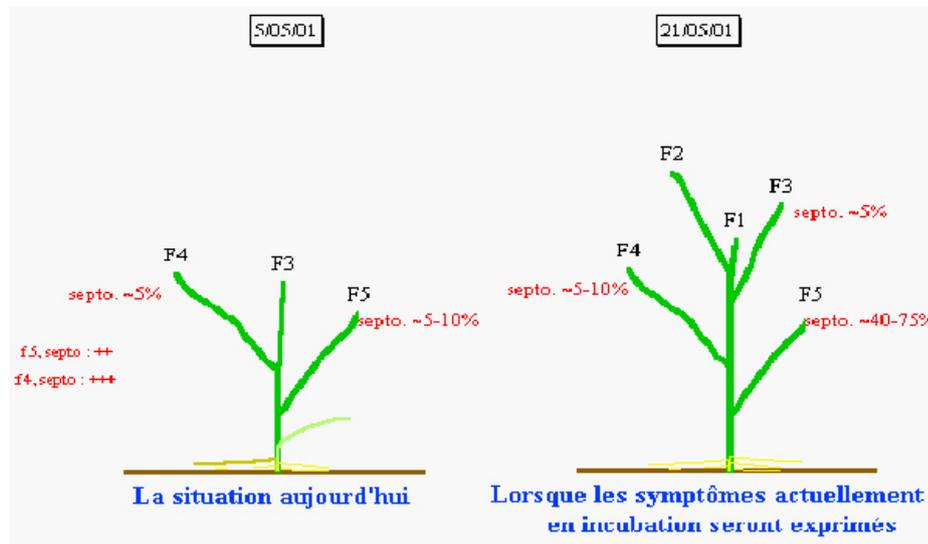


Figure 2-2- 4 : Simulation de la septoriose par « PROCULTURE » au niveau de chaque feuille (Everlange 2001).

2. soit un graphique détaillé qui se compose de plusieurs informations (figure 2-4-5) : i) infection journalière; ii) début et fin de la latence; iii) début et fin de l'émergence de chacune des cinq dernières feuilles (F5 à F1, F1 est la dernière feuille formée); iv) évolution de la septoriose sur chacune des 5 dernières feuilles (F5 à F1); v) dans la version 2002 de "PROCULTURE", il est possible d'estimer quantitativement la septoriose au niveau de chaque étage foliaire; vi) une estimation de l'évolution future (de l'ordre de 15 jours) de la latence et donc des symptômes probables.

### III.3. Calibration du Modèle

La calibration de Proculture aux conditions météorologiques et culturelles du Grand-Duché de Luxembourg a été réalisée via le Web (<http://procultureweb.fymy.ucl.ac.be:8080>) pour la plupart des cas. Les simulations de l'évolution de la septoriose via Proculture ont été continuellement améliorées en fonction des résultats de chaque saison. Les principales améliorations sont : a) la

température minimale a été abaissée de 5°C à 4°C et l'infection d'une feuille est possible dès le début de sa sortie ; b) le paramètre de « pourcentage de développement foliaire minimal pour qu'une infection soit possible » est abaissé à 5 % ; c) la possibilité de procéder au recalage phénologique et de la septoriose via le Web en introduisant le pourcentage de la dernière feuille formée. Ce dernier point constitue un grand succès pour Proculture par rapport à ses anciennes versions. Au début, le système demandait uniquement le stade phénologique observé lors de la dernière sortie effectuée sur le terrain. Cependant, en se basant uniquement sur le stade phénologique, la fiabilité de la simulation pourrait être affectée. Supposons qu'une visite a été faite dans un site x le 30 mai 2000 et la culture était à l'épiaison. Notre difficulté résultait du fait que la culture pourrait être dans cette phase soit depuis une semaine ou venait d'y entrer. Ainsi, pour chercher le meilleur ajustement, il fallait effectuer une série de simulations autour de l'épiaison en cherchant la date et le stade qui permettaient une simulation logique de la croissance de la plante avec les données d'observations.

De plus, dans cette étude, nous avons calibré, via la nouvelle version de Proculture deux types de comportement variétal: la précocité et la sensibilité. Pour les variétés sensibles (Bussard), le recalage phénologique se base sur le pourcentage de F3 formé qui doit être bien précis. Cette dernière donnée constitue l'élément clé pour toute simulation future. Pour ceci, la fiabilité d'une bonne calibration et d'une bonne simulation se base sur un bon échantillonnage qui reflète l'état de la population d'une parcelle. Pour les variétés résistantes, en plus des données relatives au recalage phénologique, des ajustements sont faits autour de la date d'observation afin d'obtenir la meilleure simulation qui reflète la réalité de la parcelle.

La simulation quantitative de la septoriose sur les 5 dernières feuilles se base sur des fonctions logistiques qui décrivent les courbes de progression de la maladie, sélectionnées en fonction de la variation de la résistance (PAVELEY, 1999). Ces fonctions se basent sur trois critères : a) le rapport entre l'inoculum et la sévérité future de la maladie est exponentielle ; b) les différences entre les très petites quantités de maladies observées sur les feuilles situées à la base de la culture détermineraient si une épidémie substantielle pourrait arriver pendant la durée de vie des feuilles supérieures ; c) le modèle traite avec la quantité de l'inoculum arrivant au sommet du couvert végétale (LOVELL *et al.*, 1997).

Il est devenu clair que la position de la source de l'inoculum par rapport au sommet du couvert végétale peut avoir une influence profonde sur l'efficacité de transfert de spores aux feuilles nouvellement émergées.

Les simulations de la quantification de la maladie ont été réalisées à l'Unité de Phytopathologie de l'UCL.

La calibration a été réalisée de 2000 à 2002 dans deux sites (Everlange et Reuland) en se basant sur les données d'observations récoltées sur le terrain à une fréquence de 2 fois/semaine pour Everlange et une fois/semaine pour Reuland.

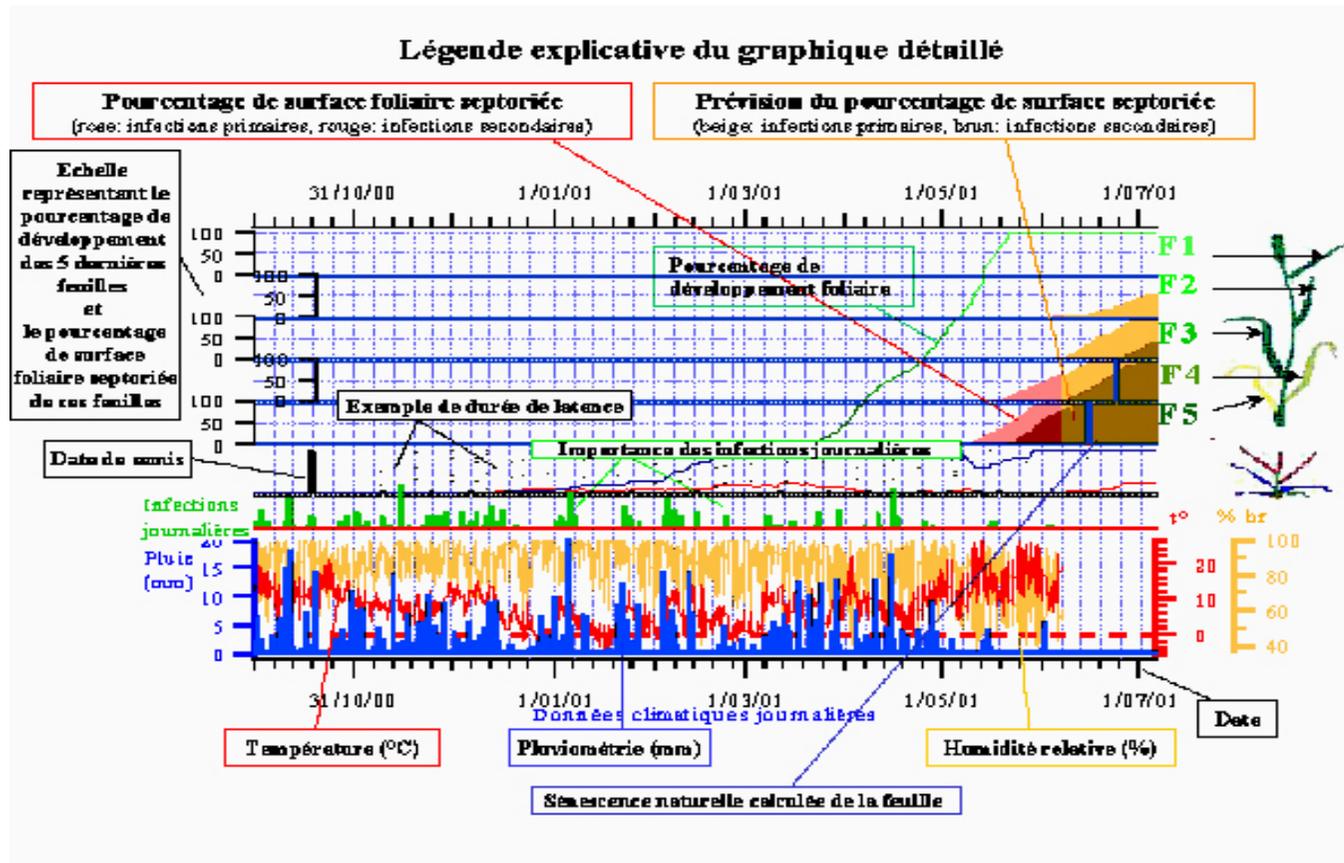


Figure 2-2- 5 : Exemple de graphe de sortie de Proculture pour chaque site.

### III.4. Validation du Modèle

Nous avons développé deux types de validation pour les simulations Proculture, la validation qualitative basée sur les occurrences statistiques et la validation quantitative basée sur les analyses de comparaison statistiques entre les quantités de maladie simulée sur chacune des cinq dernières feuilles par Proculture et celles observées sur le terrain.

La validation qualitative de Proculture a été basée sur les tables de contingence (tableau 2-2-2 A) qui permettent de calculer les différents scores statistiques nécessaires pour tester la qualité de simulation (tableau 2-2-2 B). Le principe de cette méthode est très utilisé en météorologie pour valider les dernières technologies liées au Radar et aux satellites (RUBEL *et al.*, 2002) et dans les prédictions des tornades (STEPHENSON, 2000).

Tableau 2-2-2 : Méthode de validation de Proculture. A / Table de contingence utilisé pour la vérification des différentes simulations. B/ Principaux scores statistiques appliqués pour juger la qualité de la simulation d'un modèle.

**A**

		Event Observed		
		Yes	No	Total forecast
Event Forecast	Yes	a (hits)	b (false alarms)	a+b
	No	c (misses)	d (correct rejections)	c+d
Total observed		a+c	b+d	a+b+c+d=n

**B**

Description	Formule	Intervalle	Parfait
Probability of detection (POD) of "Yes" observations	$POD = \frac{a}{a+c}$	[0,1]	1
False alarm ratio (FAR)	$FAR = \frac{b}{a+b}$	[0,1]	1
Critical success index (CSI), Threat score (TS)	$TS = CSI = \frac{a}{a+c+b}$	[0,1]	1
Accuracy (PC)	$PC = \frac{a+d}{n} 100\%$	[0,100]	100 %

La validation quantitative a été basée sur des méthodes statistiques (ANOVA, l'analyse du rapport de la somme des valeurs observées et simulées, analyse du rapport (%) de la différence de la moyenne des valeurs observées et des valeurs simulées par rapport aux valeurs simulées, étude de la corrélation pour  $\alpha = 5\%$ , analyse de la pente, analyse de l'ordonnée à l'origine de la droite de régression où x = Proculture et y = Essai).

## IV. Résultats

Les simulations de Proculture ont clairement révélé des différences importantes entre les années et entre les sites (figure 2-2-6).

En 2000, à Everlange, la F5 a été infectée par l'inoculum présent sur les feuilles situées à la base au moment de sa formation par les périodes d'infection de fin mars. La 1<sup>ère</sup> infection de F4 a été causée par les périodes d'infection de la deuxième décade d'avril. A cette date, aucun symptôme n'était observable sur la F5. La seule source de spores pour infecter la F4 était les feuilles situées à la base (F7, F6). La présence des

symptômes sur F5 et une grande probabilité d'infection fin avril ont été à l'origine de l'infection primaire de F3 pendant son émergence. Pendant le début d'émergence de F2 durant la première décade de mai, les conditions météorologiques n'étaient pas favorables à de nouvelles infections. Les nouvelles périodes d'infections ont été détectées seulement durant l'émergence de F1. F2 et F1 ont été infectées au même moment par l'inoculum généré par les feuilles F4 et F3.

A Reuland, les feuilles F5 et F4 ont été infectées durant leur émergence. L'inoculum était déjà produit sur la F5 au moment de l'émergence de F3, ce qui a provoqué une infection précoce de cette feuille le 24 avril. La F2 a été infectée pendant son émergence par l'inoculum produit sur la F4. La F1 a été infectée au moment de son émergence par l'inoculum produit sur la F3.

En 2001, à Everlange, Les feuilles F5 et F4 ont été infectées durant leur émergence par les feuilles de base. La F3 a été atteinte très probablement par l'inoculum produit sur F5 fin avril. La F2 a été probablement infectée au début de sa formation par la F4 pendant la 1<sup>ère</sup> décade de mai. Certaines F1 ont été infectées par F3 au moment de leur formation (14 avril). Pour Dream, la F2 et la F1 ont été infectées par l'inoculum produit par la F3.

A Reuland, la F3 de Bussard a été probablement infectée pendant la période d'infection de fin avril lorsque F5 était à la même position que F4 et F3. La F2 a été infectée très probablement par F3 et dans une moindre mesure par F4 (position très proche). La F1 a été infectée par l'inoculum produit sur F3. Pour Dream, la F3 a été infectée par l'inoculum produit par la F4 durant la deuxième décade de mai. La F2 et la F1 ont été infectées en même temps par l'inoculum produit sur la F3 au début du mois de juin.

En 2002, l'infection de F4 et F3 est résultante de faibles et distantes quantités d'inoculum présent sur la F5 le 17 avril. Certaines F2 présentent des symptômes très négligeables. Ces symptômes très négligeables ne devraient provenir que de F4 or, lors de la visite du 3 mai (tableau 2-2-3), aucun symptôme n'avait été détecté sur la F4. Deux hypothèses sont plausibles, a) l'infection de certaines F2 a eu lieu lors de leur formation début mai par un inoculum si faible et distant sur la F4, il n'est pas étonnant que nous ne puissions pas détecter ces symptômes primaires ; b) un transfert horizontal de l'inoculum à partir d'autres plantes avoisinantes pourrait aussi être à l'origine de l'infection de certaines F2. Concernant la F1, une infection primaire a eu lieu à partir de très faibles symptômes présents sur la F3. Les pluies du 19 mai ont été à l'origine de l'augmentation des symptômes sur la F2 et d'un cycle secondaire sur la F3. Le taux d'augmentation brutal des symptômes observés sur la F2 entre le 16 et le 18 juin pourrait être la résultante de l'infection secondaire du 25 et 26 mai mais aussi une contribution des ascospores de *M. graminicola* qui ne sont pas prises en considération par Proculture.

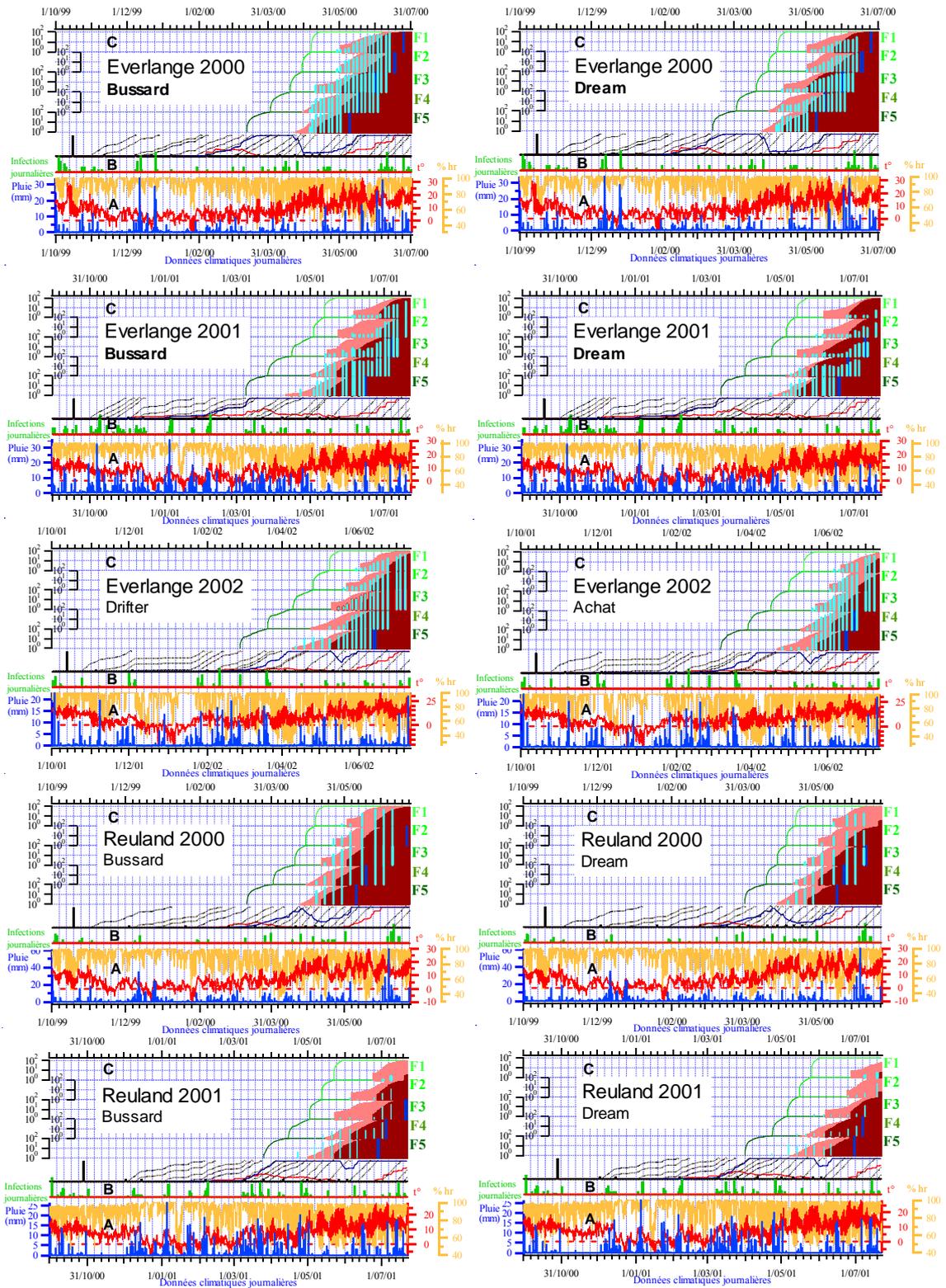


Figure 2-2-6 : Les sorties de Proculture pour les simulations du risque de la septoriose des feuilles du blé d’hiver pour les années 2000 à 2002 à Everlange et Reuland.

A : Valeurs journalières de la température moyenne de l’air (°C), Humidité relative (%) et la pluie (mm) mesurée à Everlange (2000), Useldange (2001 et 2002) et Hersberg (proche de Reuland en 2000 et 2001) - B : Nombre d’heures par jour des plus importantes probabilités d’infection - C : Lignes : développement de la surface foliaire (échelle logarithmique) des 5 dernières feuilles F5 à F1 (F1 est la dernière feuille formée), rose : quantification des symptômes issus de l’infection primaire des feuilles F5 à F1, rose foncé : les symptômes issus des infections secondaires, barres bleues : % de symptômes observés.

**Tableau 2-2-3 : Pourcentage moyen de la surface foliaire présentant des symptômes de *S. tritici* dans les dernières feuilles d'une variété sensible (Bussard) et d'une variété résistante (Dream) à Everlange et Reuland pendant les années 2000 et 2001 et les variétés Achat et Drifter à Everlange en 2002. Les valeurs en rouge représentent une différence significative par rapport à la dernière observation au seuil  $\alpha = 5\%$ . Les valeurs en noir sont les valeurs qui ne sont pas significativement différentes ( $\alpha = 5\%$ ) par rapport aux dernières observations faites sur le terrain. Le nombre de ces valeurs en noir pour chaque feuille déterminera le nombre de périodes non prévues par le modèle et non détectées sur le terrain.**

		Avril		Mai					Juin					Juillet										
		16	6	8	11	15	18	22	25	29	1	5	8	12	15	19	22	26	29	3	6	10	13	
<b>2000</b>	<b>Bussard</b> (GS39: 15/5/00)	F1	-	-	-	-	-	-	-	0.3	1	2	2	6	10	15	26	42	43	46	46	47	68	
		F2	-	-	-	-	-	-	-	2	4	11	15	22	29	42	60	72	72	75	78	78	93	
		F3	-	-	-	5	4	4	5	6	15	18	35	44	52	55	56	67	77	77	80	-	-	-
		F4	-	1	5	18	20	22	24	26	54	56	76	84	84	82	83	91.4	97.2	98	100	-	-	-
		F5	-	3	18	56	59	61	63	66	76	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Dream</b> (GS39: 22/5/00)	F1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	0.5	1	3	4	5	9	10	13	14	16	28		
	F2	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	2	3	4	7	9	20	38	37	41	42	42	66		
	F3	-	-	-	0.5	1	1	1	1	1	2	6	10	15	19	26	37	50	52	57	64	65		
	F4	-	0.1	1	4	4	4	4	5	9	12	23	27	30	43	47	56	64	67	72	-	-	-	
	F5	-	4	6	24	25	28	30	32	62	62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Everlange 2001</b>	<b>Bussard</b> (GS39: 22/5/01)	F1	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.2	0.7	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	1	2	10	12	18	20	40
		F2	-	-	-	-	-	-	-	0.8	0.3	2	1	1	1	1	2	7	8	31	34	56	59	82
		F3	-	-	-	-	1	1	2	4	3	7	4	5	3	6	6	20	27	57	55	85	82	-
		F4	-	-	-	2	2	16	13	23	31	26	33	27	32	28	32	27	54	55	88	83	-	-
		F5	0.3	4	4.2	23	24	59	60	77	80	77	79	77	82.4	78	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Dream</b> (GS39: 28/5/01)	F1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.03	1	1	0.3	0.2	5		
	F2	-	-	-	-	-	-	-	0.3	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.3	1	1	4	3.2	11	9	26	
	F3	-	-	-	-	-	0.1	0.5	1	0.5	2	1	0.4	1	2	3	2	5	14	20	23	25		
	F4	-	-	-	0.8	0.6	5	4	6	11	8	13	10	9	7	12	14	13	24	41	37	-	-	
	F5	0.5	0.2	14	12	41	38	51	66	68	67	59	60	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>2002</b>	<b>Drifter</b> (GS39: 16/5/02)	F1	-	-	-	-	-	-	-	0.3	1	2	3	5	7	10	17	-	-	24	44	42	-	
		F2	-	-	-	-	-	1	2	2	2	3	5	9	14	30	39	61	-	63	76	73	-	
		F3	-	-	-	-	0.3	2	3	10	10	21	35	50	57	75	79	90	-	93	96	94	-	
		F4	-	-	-	0.2	1	2	6	19	27	46	68	81	91	96	95	99	-	-	-	-	-	
		F5	1	9	11	11	9	19	31	36	62	72	85	98	98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Achat</b> (GS39: 22/5/02)	F1	-	-	-	-	-	-	-	0.1	1	2	1	2	5	6	8	-	-	24	39	39	-		
	F2	-	-	-	-	0.2	0.4	0.1	0.4	1	5	7	17	28	37	51	-	-	67	76	85	-		
	F3	-	-	-	-	0.1	1	3	3	5	11	26	35	48	65	76	86	-	90	91	88	-		
	F4	-	-	-	0.1	0.4	4	10	19	31	47	69	81	95	95	97	99	-	-	-	-	-		
	F5	-	0.3	0.1	0.1	1	13	29	50	73	82	94	97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>2000</b>	<b>Bussard</b> (GS39: 19/5/00)	F1	-	-	-	-	-	-	-	0.3	1	17	45	-	-	-	-	-	-	46	48	-	-	
		F2	-	-	-	5	7	-	-	-	20	50	79	-	-	-	-	-	-	78	78	-	-	
		F3	-	-	-	1	12	34	-	-	62	76	85	-	-	-	-	-	-	84	88	-	-	
		F4	-	-	-	2	7	32	58	-	90	91	99	-	-	-	-	-	-	99	-	-	-	
		F5	-	-	-	22	45	66	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Dream</b> (GS39: 25/5/00)	F1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	2	11	-	-	-	-	-	-	14	18	-	-		
	F2	-	-	-	-	-	0.2	-	-	1	8	25	-	-	-	-	-	-	27	31	-	-		
	F3	-	-	-	-	2	6	-	-	14	30	51	-	-	-	-	-	-	48	51	-	-		
	F4	-	-	-	3	5	20	-	-	49	62	82	-	-	-	-	-	-	80	-	-	-		
	F5	-	-	-	2	15	29	53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
<b>Reuland 2001</b>	<b>Bussard</b> (GS39: 28/5/01)	F1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	2	5	-	
		F2	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.1	0	0.2	-	-	-	-	-	4	11	26	-	
		F3	-	-	-	-	0.1	1	-	-	1	0.3	0.4	1	-	-	-	-	-	19	32	-	-	
		F4	-	-	-	1	3	6	8	-	10	8	7	11	-	-	-	-	-	42	-	-	-	
		F5	-	-	-	4	20	38	64	71	69	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Dream</b> (GS39: 5/6/01)	F1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3	-		
	F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.1	2	23	-		
	F3	-	-	-	-	-	0.2	-	-	0.1	1	0.2	1	-	-	-	-	-	2	13	-	-		
	F4	-	-	-	0.1	1	2	-	-	1	3	2	5.1	-	-	-	-	-	10	-	-	-		
	F5	-	-	-	1	11	9	12	11	7	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

#### IV.1. La validation qualitative

Le test de comparaison statistique au seuil  $\alpha = 5\%$  appliqué sur les valeurs observées a permis de classer deux types de valeurs (tableau 2-2-3) : a) les valeurs qui diffèrent significativement aux dernières valeurs observées sur le terrain (rouge). Ces valeurs ont été superposées aux simulations de Proculture pour calculer le nombre d'infections prévues et détectées ; b) les valeurs qui ne diffèrent pas significativement des dernières valeurs observées (noir). Ces valeurs constituent les valeurs non prévues et non détectées sur le terrain.

Cette validation qualitative est indispensable pour déterminer les fausses alertes et le pourcentage de succès du modèle. Cette validation qualitative sera confirmée par la suite par la validation quantitative qui se base sur le test Anova et les écarts entre la simulation et l'observation.

**Tableau 2-2-4 : Test de concordance entre les simulations de Proculture et les observations de la maladie sur les 5 dernières feuilles à Everlange (2000 à 2002) et Reuland (2000 à 2001). Les occurrences statistiques ont été calculées sur base de tables de contingence.**

			Infections prévues et détectées	Prévues et non détectées	Non prévues et Détectées	Non prévues et non détectées	Occurrences statistiques				
							POD	FAR	CSI	PC (%)	
<b>Everlange 2000</b>	<b>Bussard</b>	F1	10	0	1	8					
		F2	10	0	1	8					
		F3	15	0	1	10					
		F4	11	0	1	11					
		F5	8	0	2	5					
	<b>Total</b>	<b>54</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>42</b>	<b>0.9</b>	<b>0</b>	<b>0.9</b>	<b>94</b>		
	<b>Dream</b>	F1	5	2	0	7					
		F2	7	1	1	7					
		F3	7	1	1	7					
		F4	7	2	0	10					
		F5	5	0	0	6					
	<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>37</b>	<b>0.94</b>	<b>0.16</b>	<b>0.8</b>	<b>90</b>		
	<b>Everlange 2001</b>	<b>Bussard</b>	F1	6	0	1	8				
			F2	6	0	0	10				
F3			7	2	0	11					
F4			10	3	0	11					
F5			16	1	0	9					
<b>Total</b>		<b>45</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>49</b>	<b>0.98</b>	<b>0.12</b>	<b>0.87</b>	<b>93</b>		
<b>Dream</b>		F1	3	1	0	4					
		F2	4	2	0	10					
		F3	6	1	0	11					
		F4	8	1	0	11					
		F5	10	4	0	8					
<b>Total</b>		<b>31</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>44</b>	<b>1</b>	<b>0.22</b>	<b>0.78</b>	<b>89</b>		
<b>Everlange 2002</b>		<b>Achat</b>	F1	8	1	0	5				
			F2	11	1	0	3				
	F3		13	0	0	5					
	F4		10	0	0	4					
	F5		8	1	0	3					
	<b>Total</b>	<b>50</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>1</b>	<b>0.06</b>	<b>0.94</b>	<b>96</b>		
	<b>Drifter</b>	F1	7	1	1	4					
		F2	11	1	1	5					
		F3	12	1	0	5					
		F4	9	1	0	3					
		F5	10	1	1	3					
	<b>Total</b>	<b>49</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>0.94</b>	<b>0.09</b>	<b>0.84</b>	<b>90</b>		
	<b>Reuland 2000</b>	<b>Bussard</b>	F1	14	0	2	2				
			F2	20	0	2	2				
F3			25	0	0	2					
F4			16	0	0	2					
F5			13	0	0	0					
<b>Total</b>		<b>88</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>0.96</b>	<b>0</b>	<b>0.96</b>	<b>96</b>		
<b>Dream</b>		F1	4	0	0	2					
		F2	9	0	0	2					
		F3	11	0	1	2					
		F4	13	0	0	1					
		F5	8	0	0	0					
<b>Total</b>		<b>45</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>0.98</b>	<b>0</b>	<b>0.98</b>	<b>98</b>		
<b>Reuland 2001</b>		<b>Bussard</b>	F1	5	1	0	0				
			F2	7	0	0	3				
	F3		8	2	0	3					
	F4		11	1	0	4					
	F5		16	1	0	2					
	<b>Total</b>	<b>47</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.9</b>	<b>93</b>		
	<b>Dream</b>	F1	2	4	0	0					
		F2	5	1	0	1					
		F3	3	1	1	4					
		F4	5	3	0	3					
		F5	7	5	1	5					
	<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>13</b>	<b>0.92</b>	<b>0.39</b>	<b>0.58</b>	<b>68.6</b>		

La détermination des tables de contingence se base sur la figure 2-2-6 et tableau 2-2-3 pour déterminer le tableau 2-2-4. Il convient de souligner que les simulations de Proculture sont journalières alors que les observations de la maladie se font à une fréquence de deux fois par semaine pour Everlange et une fois par semaine pour Reuland. Pour calculer les infections prévus et détectées nous procédons comme suit : i) nous nous référons au tableau 2-2-3 pour voir si l'observation que nous venons de faire pour chaque étage foliaire diffère significativement par rapport à la dernière observation ; ii) si c'est le cas nous déterminons le nombre de périodes d'infections qui venaient de s'achever (figure 2-2-6) entre la première observation et la dernière en se basant sur Proculture ; iii) nous comptabilisons ces périodes en faveur des infections prévues et détectées pour chaque étage foliaire. Si les données d'observations que nous venons de récolter sur le terrain ne diffèrent pas significativement par rapport à la dernière observation faite sur le terrain mais Proculture indique trois périodes d'infections qui ont achevés entre les deux observations. Ces trois périodes seront comptabilisés en faveur des infections prévues et non détectées. Par exemple pour le calcul de la première ligne du tableau 2-2-4 pour la F1, 10 périodes d'infections ont été simulées par Proculture et détectées sur le terrain. Cependant, l'apparition des premières traces de la maladie a été prévue par Proculture pour début juin alors la maladie a été observée sur le terrain le 29 mai à une fréquence très négligeable. Cette période a été comptabilisée en faveur du score non prévues et détectées.

Ainsi, la superposition des simulations de Proculture et des valeurs détectées sur le terrain nous a permis de calculer différentes périodes (tableau 2-2-4) qui serviront de base à la détermination de tables de contingence. Ces dernières sont indispensables au calcul des occurrences statistiques (figure 2-2-7).

### Everlange 2000

		Bussard		
		Détectées		
Infections	Oui	54	0	54
	Non	6	42	48
Total		60	42	102=n

POD =  $a/a+c = 54/60 = 0.9$

FAR =  $b/a+b = 0/54 = 0$

CSI =  $a/a+c+b = 54/54+6+0 = 0.9$

PC =  $a+d/n * 100 = 54+42/102 = 94\%$

Figure 2-2-7 : Exemple de calcul des occurrences statistiques pour Bussard semée à Everlange en 2000.

En 2000, pour la variété Bussard (Susceptible), à Everlange comme à Reuland, la majorité des infections prévues par Proculture ont été détectées (POD se situe entre 0.9 et 1), aucune fausse alerte n'a été enregistrée par le logiciel (FAR = 0). Cette étude a révélé un très bon ajustement entre la simulation et l'observation (94 % de chance de réussite à Everlange et 96 % à Reuland). De plus, 90 % des périodes d'infection à Everlange et plus de 96 % à Reuland ont été correctement prévues. Le nombre d'événements détectés mais non simulés est de seulement 6 pour toutes les 5 feuilles sur un total de 102 événements. Dans certains cas, quelques rares périodes d'infection ont

été détectées sur certaines feuilles (F2 à Reuland) un à deux jours avant la date annoncée par Proculture. Probablement, la maladie apparaît sur quelques rares feuilles avant que la fin de latence n'atteigne 100%. De plus, il est important de signaler que la durée d'apparition des symptômes pour une même période entre la première apparition et le taux maximum d'apparition s'échelonne de quelques heures à 7 jours en fonction de la température (figure 2-2-8). Pour une température optimale entre 12 °C et 14°C, la durée entre la première apparition et le taux maximum n'est que de quelques heures à 2 ou 3 jours mais cette durée s'allonge lorsque la température de l'air est supérieure à 18°C (figure 2-2-9). Ceci explique la longue durée entre la première apparition et le taux maximal d'apparition pendant le mois de juin. Ce dernier argument semble expliquer pourquoi le taux de maladie à Reuland est passé sur la F2 de Bussard de 19.5 % le 5 juin à 78.6 le 26 juin et pour la F1 de 0.7 le 5 juin à 45.4 le 26 juin (figure 2-2-8 B).

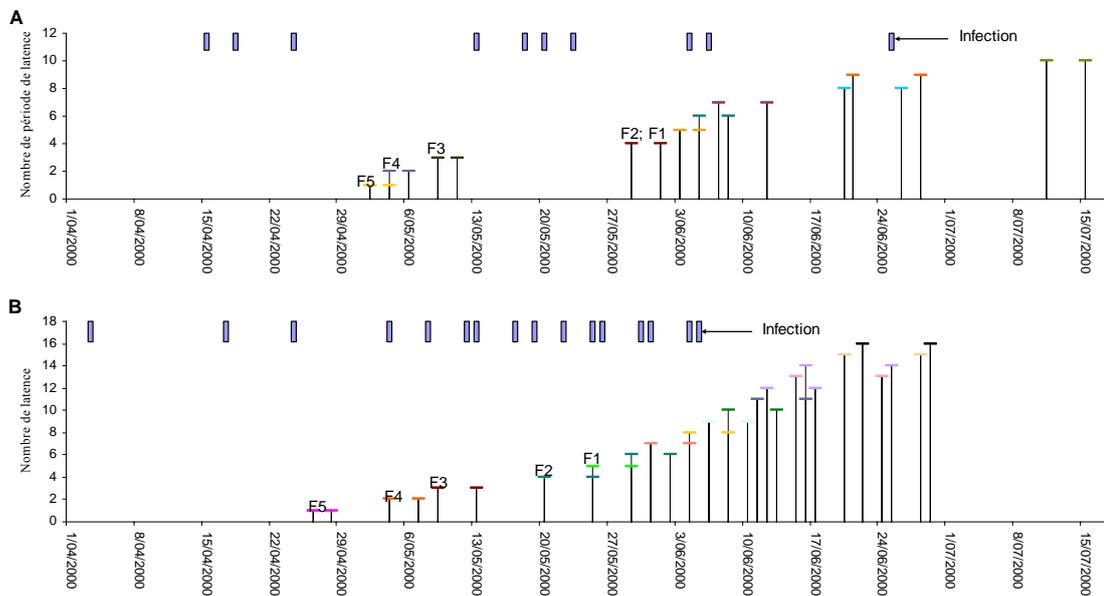


Figure 2-2-8 : La durée de chaque latence entre la première apparition des symptômes et le taux maximum d'apparition en 2000 à Everlange (A) et Reuland (B). Les lettres indiquent le moment d'apparition des premiers symptômes sur les 5 dernières feuilles.

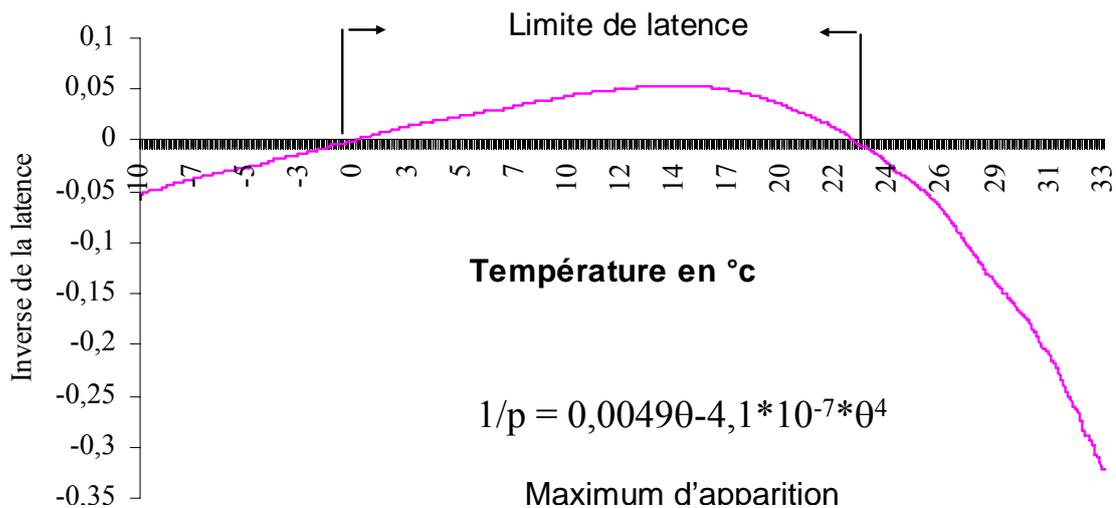


Figure 2-2-9 : Les limites de la latence en fonction de la température pour le taux maximum d'apparition de symptômes.

Pour la variété Dream (résistante), la validation qualitative est très satisfaisante pour Everlange comme pour Reuland. Dans ce dernier site, le succès du modèle est de 98 %

pour cette variété sans aucune fausse alerte ( $FAR = 0$ ) et toutes les périodes d'infections ont été correctement prévues ( $CSI = 98\%$ ). Cependant, à Everlange, le taux de réussite dépasse  $90\%$  mais quelques fausses alertes ont été enregistrées ( $FAR = 16\%$ ). Ceci pourrait s'expliquer par la fréquence d'échantillonnage qui est intensive ( $2 \times /$  semaine) à Everlange par rapport à Reuland ( $1 \times /$  semaine). Dream est une variété très résistante et l'appréciation de l'évolution des premiers symptômes sur les feuilles a été très difficile d'une part par la très faible réponse à une période d'infection primaire de Dream par rapport à Bussard et d'autre part un échantillonnage aléatoire de deux fois par semaine rend difficile d'apprécier l'évolution des premiers symptômes sur la feuille. Ceci explique pourquoi certaines périodes ont été prévues à Everlange mais non détectées. Une synthèse du modèle en relation avec les données d'observation d'Everlange et Reuland pour Bussard et Dream (figure 2-2-10) confirme la bonne concordance qui existe entre chaque période d'infection prévue et l'évolution des symptômes sur les trois dernières feuilles et la chute de la surface verte. La nécrose de F2 et F1 de Bussard a été très accélérée par rapport à Dream. Ceci est dû à la sensibilité de Bussard à la septoriose, la rouille brune et l'helminthosporiose dont les conditions épidémiologiques étaient très favorables en 2000.

En 2001, pour Bussard, les résultats des scores statistiques font apparaître une probabilité de succès de « Proculture » de l'ordre de  $93\%$  dont  $87\%$  sont correctement prévus à Everlange. A Reuland, le succès de Proculture enregistré était identique à Everlange mais avec plus de  $90\%$  de périodes d'infection qui ont été correctement prévus.

Pour Dream, les résultats de simulation à Everlange indiquent un taux de réussite de  $89\%$  avec  $78\%$  correctement simulés. Tandis qu'à Reuland, le taux de réussite était seulement de  $69\%$  dont  $58\%$  correctement prévus. Ces fausses alertes enregistrées en 2001 par rapport à 2000 pour Bussard et particulièrement pour Dream à Reuland ne sont pas dues à Proculture mais aux conditions culturales de cette année. En effet, en 2001, la population de plantes de chaque variété et particulièrement Dream était très hétérogène à cause des intempéries hivernales, ce qui a entraîné une diminution du nombre de plants à la sortie de l'hiver à Everlange mais surtout à Reuland. Cette hétérogénéité de la population de Dream à Everlange et particulièrement à Reuland rend difficile l'appréciation des nouvelles périodes d'infections prévues par Proculture, ce qui a entraîné un grand nombre de fausses alertes.

En 2002, le succès du modèle a été confirmé à Everlange pour Achat comme pour Drifter. Ce taux de réussite est de  $96\%$  pour Achat avec  $94\%$  de périodes correctement prévues et des fausses alertes ne dépassant pas  $6\%$ . Pour Drifter, ce taux de réussite est de  $90\%$  avec  $9\%$  de fausses alertes et  $84\%$  de périodes correctement prévues.

Le nombre de périodes d'infections à Everlange en 2002 (57) est légèrement supérieur à celui de 2000 (54) et très important par rapport à 2001 (45). Concernant les trois étages foliaires supérieurs (F1, F2 et F3), le nombre de périodes d'infections en 2002 (35) est similaire à 2000 et très important par rapport à 2001 (19).

A Reuland, le nombre de périodes d'infection pendant l'année 2001 (47) est très inférieur à celui de l'année 2000 (88) surtout pour celles qui concernent les trois étages foliaires supérieurs (F1, F2 et F3). Le nombre de périodes d'infections était de 49 en 2000 pour les trois dernières feuilles par rapport à 20 en 2001, ce qui explique la faible évolution de la maladie enregistrée sur ces trois feuilles. Le nombre de périodes d'infections est important à Reuland par rapport à Everlange en 2000 et 2001.

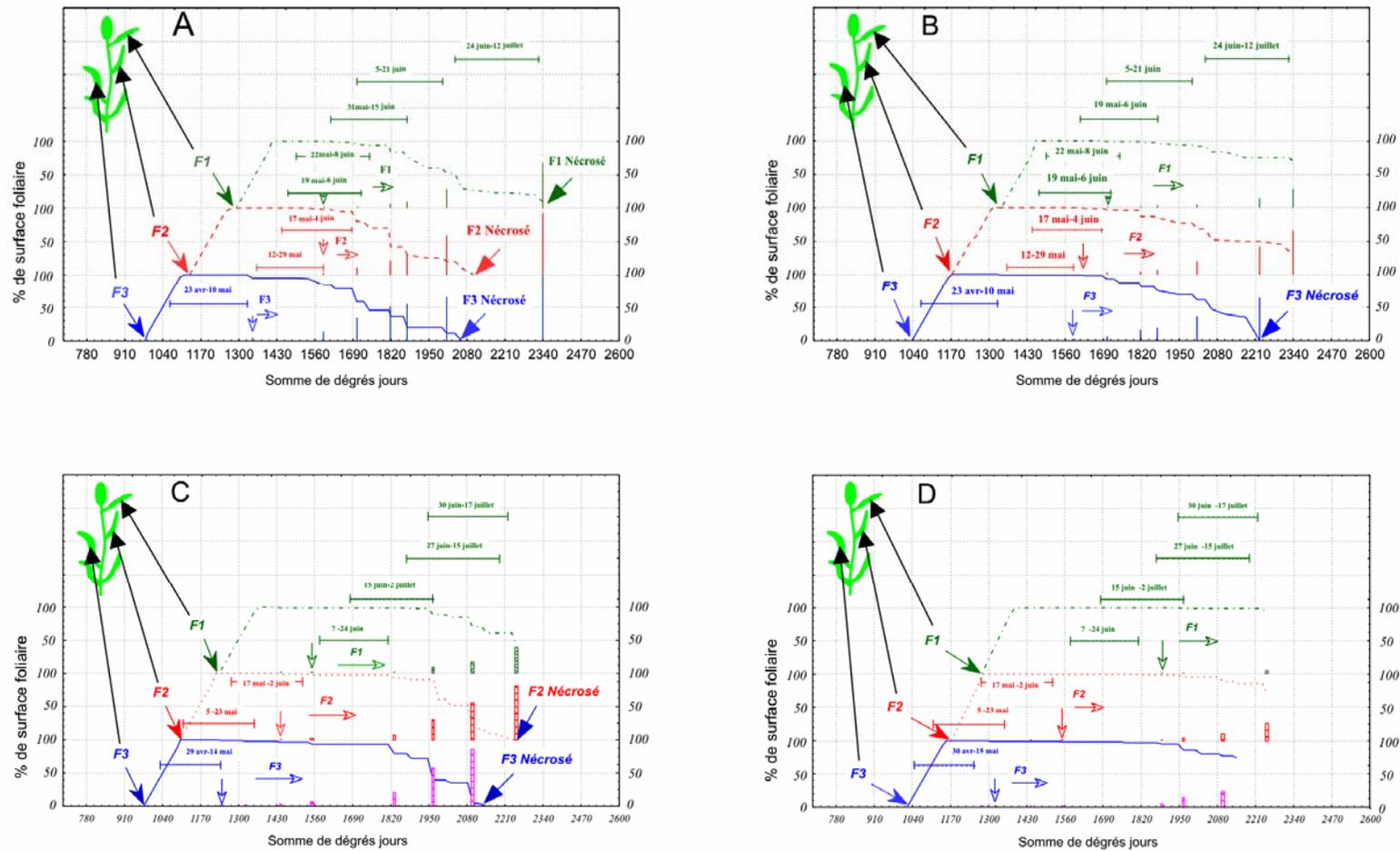


Figure 2-2-10 : Relation périodes d’infections prévues par Proculture (lignes en couleurs discontinues) , formation des trois dernières feuilles (courbes continu) et le taux de la septoriose (barres verticales), pour Bussard à Everlange (A) et Reuland (C) et pour Dream à Everlange (B) et Reuland (D) en 2000 en fonction de la somme de degrés jours. Les flèches verticales indiquent le moment d’apparition des premiers symptômes sur chaque feuille. Les flèches horizontales indiquent l’évolution des symptômes.

## IV.2. La validation quantitative

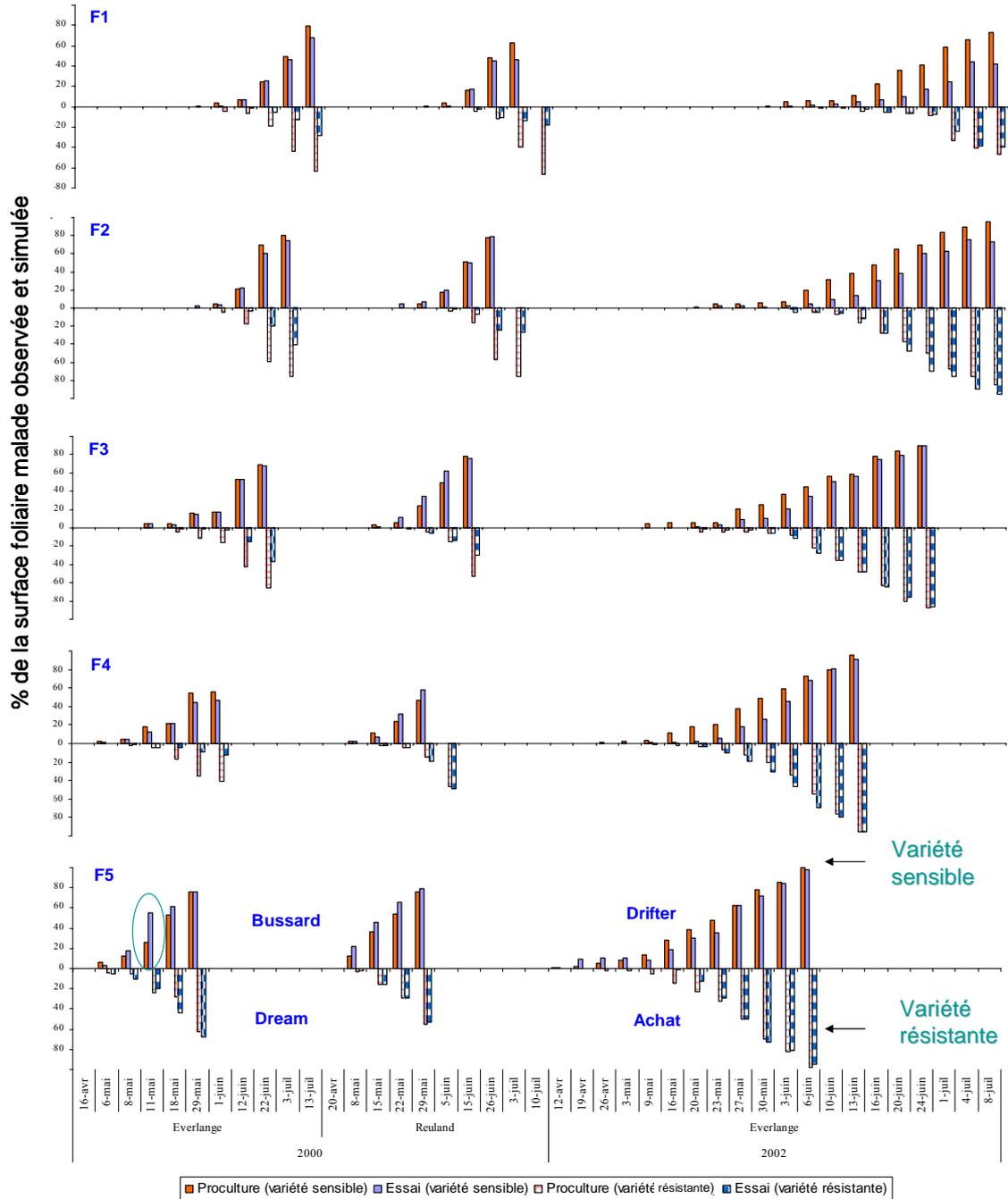
En 2000, pour la variété Bussard, il existe une grande concordance entre les valeurs de la septoriose simulées sur les cinq dernières feuilles et celles observées (figure 2-2-11) à Everlange et à Reuland. La corrélation entre les valeurs simulées et celles observées est excellente et significative ( $P < 0.001$ ) avec un coefficient de corrélation proche de 1 (tableau 2-2-5). La droite de régression a un taux de variation positif (a) proche de 1 et une offset (b) proche de 0. Le test ANOVA (P) ne révèle aucune différence significative entre les valeurs quantifiées issues de la simulation et celles de l'observation des 5 dernières feuilles. De plus, le rapport entre  $\Sigma$  observée /  $\Sigma$  simulée est proche de 1 et le pourcentage relatif de la différence entre la moyenne observée et celle simulée par rapport à la moyenne simulée (figure 2-2-13) est très négligeable, ce qui témoigne d'une bonne concordance entre les valeurs observées et celles simulées.

Pour Dream, un très bon ajustement a été observé entre les valeurs observées et celles simulées pour les trois feuilles situées à la base (F5, F4 et F3) à Reuland et à Everlange pour F5 et F3 (figure 2-2-11). Pour la F4 à Everlange, cet écart s'explique plutôt par l'échantillonnage intensif comme évoqué ci-dessus lors de la validation qualitative. Le coefficient de corrélation est proche de 1 (tableau 2-2-5), ce qui veut dire que des réponses ont été détectées pour la majorité des périodes d'infections prévues. Cependant, lors du passage de F2 à F1, l'écart entre la simulation et l'observation devient très hautement significatif ( $P < 0.001$ ) bien que la corrélation soit excellent (un bon ajustement qualitatif qui confirme les occurrences statistiques calculées précédemment). En effet, l'apparition de la maladie a été détectée sur la F2 et la F1 à la même date que Proculture mais l'étalement et l'évolution de la maladie sur toute la surface foliaire se fait à une vitesse très lente par rapport à celle du logiciel. Dream se démarque beaucoup des autres variétés par sa phénologie et son comportement très résistant vis-à-vis de la septoriose dans les étages foliaires supérieurs. Pour ajuster ces deux derniers étages foliaires (F2, F1), en plus de l'équation logistique décrivant l'allure de la maladie, il faut insérer un indice relatif à la résistance. Nous avons calculé cet indice à partir de l'écart relatif entre les valeurs de la septoriose observées et les simulations à Everlange et à Reuland et nous avons remarqué qu'il se situe entre 30 % pour la F2 et 50 % pour la F1 (figure 2-2-13).

En 2001, un bon ajustement (tableau 2-2-5) a été observé pour Bussard à Everlange entre la simulation et l'observation (différence non significative) pour toutes les feuilles à l'exception de F3. Pour cette dernière feuille, bien que l'allure de la maladie observée suive la même tendance que celle simulée, les pourcentages quantifiés sont fort éloignés (figure 2-2-12). Ceci pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité de la population suite aux intempéries hivernales qui se marquaient beaucoup plus à Reuland par rapport à Everlange.

À Reuland, l'étude de la corrélation révèle la même tendance entre la simulation et l'observation mais concernant l'estimation de la quantification, l'écart a été important à cause de l'hétérogénéité de la population. Donc, cet écart observé n'est pas dû au logiciel mais plutôt aux conditions météorologiques et culturelles de la saison.

En 2002, une très bonne concordance a été observée entre la simulation et l'observation (figure 2-2-11). Cet ajustement s'observe beaucoup mieux sur Achat par rapport à Drifter. Cependant, aucune différence significative n'a été enregistrée entre les valeurs simulées et celles observées des cinq dernières feuilles pour Achat comme pour Drifter.



**Figure 2-2-11 : Comparaison des valeurs simulées par Proculture et celles observées à Everlange et Reuland, pour les 5 dernières feuilles de Bussard (variété sensible) et Dream (variété résistante) en 2000, Drifter et Achat en 2002 avec ajustement du % septoriose au nombre d'heures favorables. Pour chaque feuille, l'ordonné en dessus de l'axe des abscisses représente les valeurs simulées (Proculture) et observées (Essai) de Bussard (à gauche) en 2000 à Everlange et Reuland et Drifter (à droite) à Everlange en 2002. l'ordonné en dessous de l'axe des abscisses représente les valeurs simulées et observées de Dream (à gauche) en 2000 à Everlange et Reuland et Drifter (à droite) à Everlange en 2002.**

1

**Tableau 2-2-5 : Résultats de tests statistiques entre la simulation de Proculture et l'observation dans les deux sites d'essai de 2000 à 2002 pour Everlange et 2000 à 2001 pour Reuland. Avec R : coefficient de corrélation, P : Test ANOVA au seuil  $\alpha = 5\%$  entre les valeurs simulées et les valeurs observées, a : le taux de variation de l'équation de régression ( $x = \text{Proculture}$  et  $y = \text{Essai}$ ), b : offset de l'équation de régression.**

P > 0.05 : NS (Non significatif) ; P < 0.05 : \* (significatif) ; P < 0.01 : \*\* (hautement significatif) ; P < 0.001 : \*\*\* (très hautement significatif).

Variétés		Bussard				Dream				Drifter				Achat			
		R	P	a	b	R	P	a	b	R	P	a	b	R	P	a	b
<b>Everlange 2000</b>	F1	0.99*	NS	0.89	0.11	0.98*	***	0.4	-0.6								
	F2	0.99*	NS	0.9	0.36	0.97*	*	0.47	-0.82								
	F3	0.99*	NS	0.98	-0.04	0.96*	NS	0.5	-1.7								
	F4	0.99*	NS	0.83	-0.1	0.97*	***	0.27	0.5								
	F5	0.93*	NS	1	6	0.96*	NS	1	2								
<b>Everlange 2001</b>	F1	0.98	NS	0.56	-4	0.99*	**	0.06	-0.6								
	F2	0.86*	NS	0.44	5.9	0.84	***	0.06	-0.07								
	F3	0.83	***	0.21	-0.32	0.94	***	0.08	0.38								
	F4	0.94*	NS	0.55	6.85	0.97*	NS	0.47	2.2								
	F5	0.97*	NS	1.6	-0.025	0.97*	NS	1.58	2.4								
<b>Everlange 2002</b>	F1									0.95*	NS	0.6	-3.4	0.99*	NS	0.83	0.39
	F2									0.97*	NS	0.81	-5.6	0.99*	NS	1.18	-0.6
	F3									0.99*	NS	1	-10.19	0.99*	NS	0.99	0.22
	F4									0.97*	NS	1	-9.2	0.99*	NS	1	4
	F5									0.98*	NS	0.94	-0.09	0.99*	NS	1.06	-5.7
<b>Reuland 2000</b>	F1	0.98*	NS	0.81	0.28	0.93*	***	0.29	0.97								
	F2	0.99*	NS	0.98	1.5	0.99*	*	0.4	0.2								
	F3	0.98*	NS	1	2.6	0.98*	NS	0.6	1.5								
	F4	0.99*	NS	1.28	-2.2	0.99*	NS	1	0.7								
	F5	0.99*	NS	1	5	0.99*	NS	0.98	-0.44								
<b>Reuland 2001</b>	F1	0.98*	*	0.13	-0.43	-	-	-	-								
	F2	0.96*	**	0.12	-0.67	0.91*	NS	0.4	-4.3								
	F3	0.95*	***	0.02	0.4	0.89*	***	0.17	0.06								
	F4	0.91*	*	0.28	3.6	0.98*	***	0.17	0.53								
	F5	0.9*	NS	1.93	17.2	0.46	*	0.19	8.4								

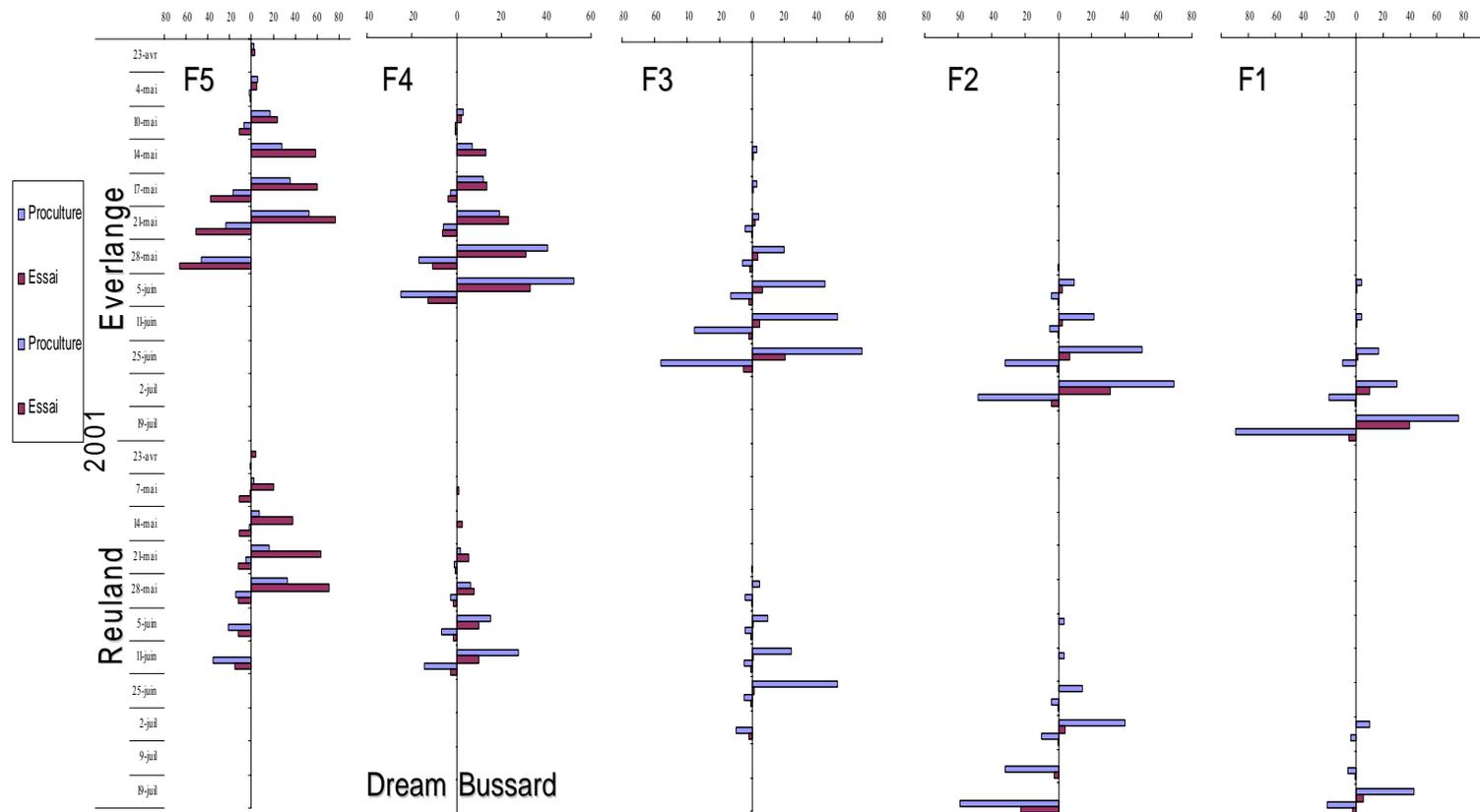
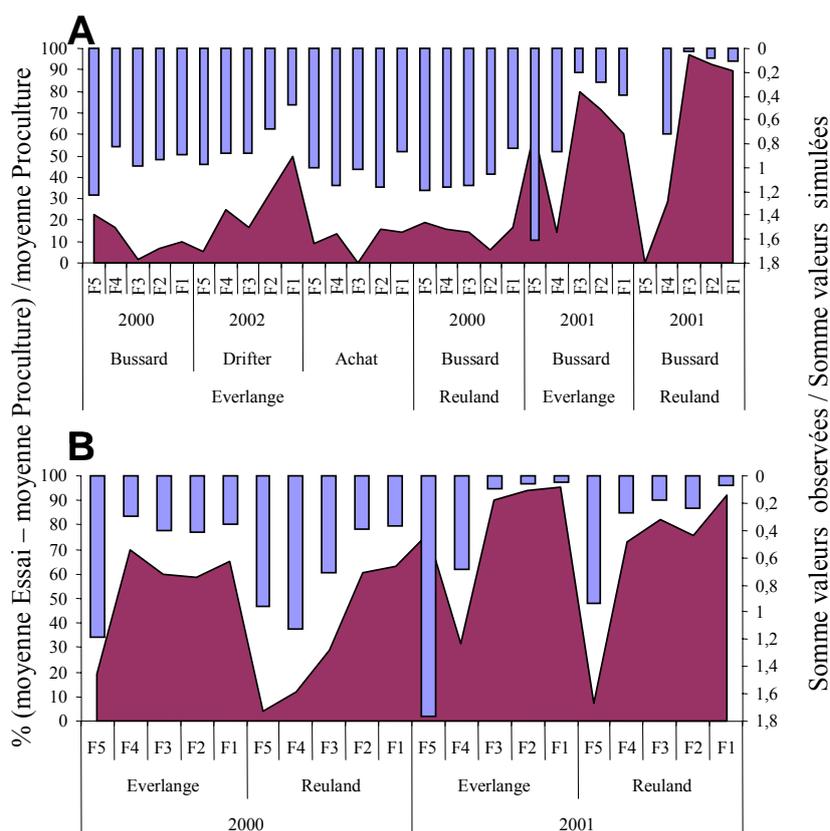


Figure 2-2-12 : Comparaison des valeurs simulées par Proculture et celles observées à Everlange et Reuland, pour les 5 dernières feuilles de Bussard (variété sensible) et Dream (variété résistante) en 2001. Pour chaque feuille, l'ordonné en dessus de l'axe des abscisses représente les valeurs simulées (Proculture) et observées (Essai) de Bussard en 2001 à Everlange et Reuland. L'ordonné en dessous de l'axe des abscisses représente les valeurs simulées et observées de Dream en 2001 à Everlange et Reuland.



**Figure 2-2-13: Résultats du rapport  $\Sigma$  % de la surface foliaire atteinte observée dans les essais /  $\Sigma$  % de la surface atteinte simulée par Proculture (Barre bleue) et le % en valeur absolue de la différence de la moyenne des essais et celles simulées par rapport à celles simulées par Proculture sur les 5 dernières feuilles (courbe). A : Résultats des variétés sensibles et celles qui tendent vers la sensibilité, B : résultats de Dream (variété résistante).**

Pour Achat, les déviations entre les valeurs simulées et observées ne dépassent pas 10 % (figure 2-2-13) et atteignent même 0 % pour F3. Pour Drifter, ces déviations sont très négligeables et non significatives pour les étages foliaires situés à la base mais ces déviations ont été très importantes pour la F1 et la F2 (entre 30 % pour la F2 et 50 % pour la F1). Remarquons que pour les variétés sensibles, la simulation quantitative fonctionne très bien pour les 5 feuilles (F5 à F1). Cependant, pour les variétés résistantes ou qui ont une tendance vers la résistance, la différence entre la simulation et l'observation est presque négligeable pour les étages situés à la base mais un changement de comportement est enregistré pour les deux derniers étages foliaires. Cette situation a été enregistrée aussi pour la variété Flair (cf. chapitre III). Pour ces variétés, un facteur de correction est à ajouter pour les deux derniers étages foliaires (F1 et F2). Il s'agit de programmer un facteur de réduction de 30% sur la simulation F2 et de 50 % sur la simulation de F1.

## V. Discussion

Deux méthodes statistiques ont été appliquées pour la validation de Proculture au Grand-Duché de Luxembourg : la validation qualitative et la validation quantitative. La validation qualitative a été basée sur les scores statistiques calculés à partir des tables de contingences. Cette méthode a ses avantages mais aussi quelques faiblesses. Son grand avantage est qu'elle permet d'estimer les fausses alertes (FAR) et le succès du logiciel

(CSI). Le plus grand avantage de cette méthode est le calcul de FAR et de CSI qui permet de juger la fiabilité du logiciel. Parmi les faiblesses de cette méthode est la différence du pas de temps entre les dates d'observations et les simulations du logiciel. Cependant, cette méthode a montré un grand succès pour la validation du radar météorologique (pas de temps en minutes) en fonction des stations météorologiques (pas de temps journalier) (RUBEL *et al.*, 2002). Cette méthode constitue la meilleure alternative pour la validation qualitative. En effet, les simulations de l'apparition des premières apparitions des symptômes par Proculture sur les cinq dernières feuilles (F5 à F1, F1 étant la dernière feuille formée) ont été confirmées sur le terrain. Cette méthode basée sur les occurrences statistiques permet de calculer les scores pour chaque feuille simulée. Les validations qualitative et quantitative sont complémentaires. Les résultats de la validation qualitative sont confirmés par la validation quantitative qui se base sur la comparaison entre les valeurs simulées et observées. Par exemple, en 2000 pour Bussard à Everlange et Reuland, la validation quantitative n'a révélé aucune différence significative entre les valeurs simulées par Proculture et celles observées sur le terrain et un coefficient de corrélation proche de 1. La validation qualitative fournit un CSI supérieure à 90% et aucune fausse alerte. Les deux méthodes appliquées pour la validation de Proculture confirment le succès de ses simulations au Grand-Duché de Luxembourg. La particularité de ce logiciel est sa capacité d'analyser les interactions entre le blé d'hiver et le développement de *S. tritici* pour simuler la progression de la maladie dans la culture. Certaines difficultés résultent dans le processus de transfert d'inoculum entre les étages foliaires par le contact direct entre les feuilles (LOVELL *et al.* 1997 ; SHAW & ROYLE.1993). Le transfert horizontal de l'inoculum entre les feuilles reste à améliorer. Cependant, les trois années de validation de Proculture au Grand-Duché de Luxembourg ont révélé que les sorties du modèle pourraient être utilisées pour prédire les infections primaires et secondaires exprimées ou en incubation à condition d'être plus précis sur le recalage phénologique.

Concernant ce dernier point, pendant la phase de montaison, il est très difficile de se prononcer sur le n° de l'étage foliaire en formation sans recours soit à la méthode de dissection ou au marquage des feuilles. Cet input est très important pour le suivi futur de la maladie. En outre, ce point constituera un grand dilemme lorsque l'agriculteur introduira lui-même les informations relatives à sa parcelle ou à son champ. Toutes les décisions qu'il va prendre par la suite peuvent être biaisées si le n° de la feuille introduite au sein de Proculture ne correspond pas réellement à celui de la parcelle. Une alternative serait de déterminer pour chaque variété la somme de degrés jours correspondant à chaque étage foliaire entre le semis et le début de sa formation. L'étude réalisée sur Flair à Everlange et Reuland révèle (figure 2-2-14) que la formation des trois étages foliaires a été faite à un intervalle de somme de degrés jours proches entre 2000 et 2001. Ce modèle fournit aussi des informations sur la progression de la maladie sur les cinq dernières feuilles (F5 à F1). Il donne des informations relatives à la dynamique de la sévérité de la maladie sur les 5 dernières feuilles. Actuellement, Proculture garantit la possibilité de moduler la différence variétale. Ce dernier point constitue une des originalités de ce travail. Ceci fait démarquer Proculture des systèmes d'avertissements plus classiques. Le succès du modèle dépasse 90 % à Everlange et atteint 96 à 98 % à Reuland pour les variétés sensibles (Bussard) et les variétés résistantes (Dream). La septoriose des feuilles est causée principalement par la forme anamorphe *S. tritici*. En outre, des auteurs recommandent de développer des modules concernant la forme téléomorphe *M. graminicola* pour expliquer des changements brutaux dans le taux de maladie exprimé (CHEN & MAC DONALD, 1996 ; KEMA & SILFHOUT, 1996 ; HUNTER *et al.*, 1999 ; ERIKSEN *et al.*, 2001) ainsi que la compétition

avec les autres maladies particulièrement la rouille brune qui a été observée sur Bussard à Everlange en 2000. En effet, la rouille ne se développe que lorsqu'elle est en avance sur la septoriose et si les conditions climatiques lui sont favorables. Il y a donc une course de vitesse entre la rouille qui infecte tous les étages du couvert et la septoriose qui se propage de feuille en feuille du bas vers le haut. Au niveau foliaire, la production de spores est largement diminuée quand les deux parasites coexistent sur la même feuille (ROBERT *et al.*, 2002 ; ROBERT, 2003 ; ROBERT *et al.*, 2004). D'une part, la septoriose recouvre les lésions de rouille qui cessent de sporuler. Mais, de plus, la sporulation des lésions de rouille situées sur la même feuille que celles de septoriose est également très affectée : la taille ainsi que la sporulation par unité de surface sont diminuées (ROBERT *et al.*, 2002 ; ROBERT, 2003 ; ROBERT *et al.*, 2004). De plus, il est important de prédire non seulement le moment d'apparition des premiers symptômes mais aussi le moment où le taux maximal de symptômes est atteint. Ceci permettrait de prévoir plus précisément le moment de nécrose des trois dernières feuilles.

Concernant, la validation quantitative, les tests statistiques révèlent un grand succès du modèle pour les variétés sensibles pendant toutes les années de validation. Ceci constitue un grand succès de Proculture pour l'évaluation des avertissements du moment optimum de traitement. Pour les variétés résistantes (Dream), la concordance a été très importante entre la simulation et l'observation pour les étages foliaires situés à la base. Mais pour les deux derniers étages, une surestimation a été observée. La variété ne se comporte pas de la même façon entre les étages foliaires de la base et ceux du sommet (RAPILLY, 1991). Trois types de résistances variétales à la septoriose sont connues : a) un ralentissement du cycle du champignon (SHAW, 1990) ; b) une diminution du taux de multiplication du champignon par cycle (SHAW & ROYLE, 1993) ; c) une phénologie différente résultant en une mauvaise synchronisation de la sortie des feuilles avec les épisodes pluvieux (SHAW & ROYLE, 1993). Pour améliorer, il est important d'ajouter un facteur correctif correspondant à 30 % de la simulation pour la F2 et 50 % pour la F1.

Enfin, vu le succès de validation de la plate-forme Proculture au Grand-Duché de Luxembourg, il a été utilisé en 2001 et 2002 pour aider les agriculteurs luxembourgeois à mieux gérer leur culture et à définir le moment optimum du traitement. Ce sont surtout les premières infections prévues sur F3 (entre 5 et 10 %) et les simulations des futures latences qui ont été prises en considération pour déclencher un signal d'alarme. Actuellement, ce logiciel est utilisé pour évaluer les avertissements sur tout le territoire luxembourgeois en fonction des différentes caractéristiques climatiques de ce pays dans le cadre du projet Sintama : « Conception et élaboration d'un système intégré d'avertissement des maladies cryptogamiques du blé d'hiver au Luxembourg » financé par l'ASTA et coordonnée par la Cellule CREBS du CRP-GL. Les avertissements évalués via Proculture sont publiés dans la page Web de la Chambre d'Agriculture Luxembourgeoise en français et en allemand et dans la presse agricole luxembourgeoise en allemand. Ce logiciel est continuellement amélioré grâce aux résultats de chaque saison. Parmi les perspectives, il est prévu d'approfondir les seuils de maladie de F3 et de F4 pour formuler un avertissement. Avec le succès de Proculture enregistré, les études ultérieures seraient de déterminer le seuil approximatif à prendre en considération selon les variétés et l'insérer au sein de Proculture. Des améliorations sont possibles aussi pour prévoir la maladie à long terme en introduisant au sein du logiciel des données météorologiques issues des centres de prévision météorologiques. Ceci pourrait se faire par une collaboration avec les instituts météorologiques.

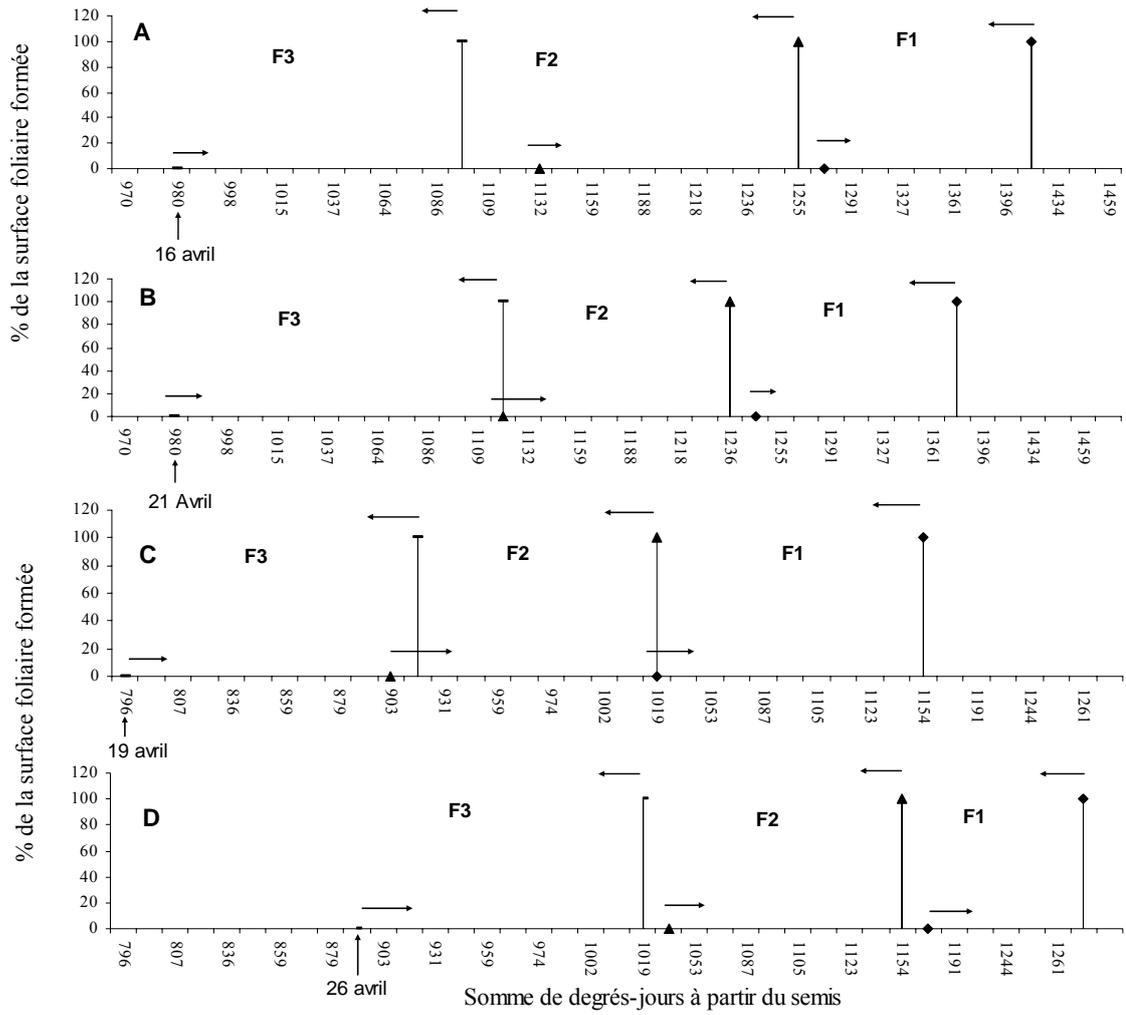


Figure 2-2-14 : Début approximatif de la formation des trois étages foliaires de Flair à Everlange en 2000 (A), en 2001 (B) et Reuland en 2000 (C) et 2001 (D).

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

2-2-1 : Tableau synthétique de la littérature des conditions météorologiques favorisant l'infection de <i>S. tritici</i> . Les conditions de Proculture sont mentionnées par MOREAU & MARAITE (1999) et CALAY <i>et al.</i> , 2001. Les chiffres () représentent le nombre de jours. Min/minimale ; Opt/optimale ; Max/ maximale ; Int/intensité ; h/heure. ....	II-5
2-2-2 : Méthode de validation de Proculture. A/ Table de contingence utilisé pour la vérification des différentes simulations. B/ Principaux scores statistiques appliqués pour juger la qualité de la simulation d'un modèle. ....	II-11
2-2-3 : Pourcentage moyen de la surface foliaire présentant des symptômes de <i>S. tritici</i> dans les dernières feuilles d'une variété sensible (Bussard) et d'une variété résistante (Dream) à Everlange et Reuland pendant les années 2000 et 2001 et les variétés Achat et Drifter à Everlange en 2002. Les valeurs en rouge représentent une différence significative par rapport à la dernière observation au seuil $\alpha = 5\%$ . Ces valeurs sont une réponse à une période de latence. Les valeurs en noir sont les valeurs qui ne sont pas significativement différentes ( $\alpha = 5\%$ ) par rapport aux dernières observations faites sur le terrain. La somme de ces valeurs pour chaque feuille déterminera le nombre de périodes non prévues par le modèle et non détectées sur le terrain. ....	II-14
2-2-4 : Test de concordance entre les simulations de Proculture et les observations de la maladie sur les 5 dernières feuilles à Everlange (2000 à 2002) et Reuland (2000 à 2001). Les occurrences statistiques ont été calculées sur base de tables de contingence. ....	II-15
2-2-5 : Résultats de tests statistiques entre la simulation de Proculture et l'observation dans les deux sites d'essai de 2000 à 2002 pour Everlange et 2000 à 2001 pour Reuland. Avec R : coefficient de corrélation, P : Test ANOVA au seuil $\alpha = 5\%$ entre les valeurs simulées et les valeurs observées, a : le taux de variation de l'équation de régression ( $x = \text{Proculture}$ et $y = \text{Essai}$ ), b : offset de l'équation de régression. ....	II-22

## FIGURES

2-2-1 : Résultats de corrélation entre les conditions météorologiques hivernales des années 2000, 2001 et 2003 et le niveau de maladie sur la F2 pendant la maturité laiteuse exprimée en logarithme dans trois sites d'essai (Everlange, Reuland et Moselle). ....	II-4
2-2-2 : Comparaison des simulations de l'infection des modèles TYLDESLEY & THOMPSON (1980), ADAS et Proculture. Station météorologique d'Everlange (2000). ....	II-5
2-2-3 : La latence selon SHAW (1990). A/ Les limites du modèle concernant le paramètre température. B/ Cumul de la latence en fonction de deux équations (variétés sensible et résistante) pour chaque infection. Les petites flèches vertes représentent la fin de la latence pour les variétés sensibles et celles en violet représentent la fin de la latence pour les variétés résistantes. Les flèches avec une ligne continue représentent le début de la formation des trois dernières feuilles de Bussard (sensible) et celles en lignes discontinues représentent le début de la formation des trois dernières feuilles de Dream (résistante). ....	II-7
2-2-4 : Simulation de la septoriose par « PROCULTURE » au niveau de chaque feuille (Everlange 2001). ....	II-8
2-2-5 : Exemple de graphe de sortie de Proculture pour chaque site. ....	II-10
2-2-6 : Les sorties de Proculture pour les simulations du risque de la septoriose des feuilles du blé d'hiver pour les années 2000 à 2002 à Everlange et Reuland. ....	II-13
2-2-7 : Exemple de calcul des occurrences statistiques pour Bussard semée à Everlange en 2000. ....	II-16
2-2-8 : La durée de chaque latence entre la première apparition des symptômes et le taux maximum d'apparition en 2000 à Everlange (A) et Reuland (B). Les lettres indiquent le moment d'apparition des premiers symptômes sur les 5 dernières feuilles. ....	II-17
2-2-9 : Les limites de la latence en fonction de la température pour le taux maximum d'apparition de symptômes. ....	II-17
2-2-10 : Relation périodes d'infections prévues par Proculture (lignes en couleurs discontinues), formation des trois dernières feuilles (courbes continues) et le taux de la septoriose (barres verticales), pour Bussard à Everlange (A) et Reuland (C) et pour Dream à Everlange (B) et Reuland (D) en 2000 en fonction de la somme de degrés jours. Les flèches verticales indiquent le moment d'apparition des premiers symptômes sur chaque feuille. Les flèches horizontales indiquent l'évolution des symptômes. ....	II-19
2-2-11 : Comparaison des valeurs simulées par Proculture et celles observées à Everlange et Reuland, pour les 5 dernières feuilles de Bussard (variété sensible) et Dream (variété résistante) en 2000, Drifter et Achat en 2002 avec ajustement du % septoriose au nombre d'heures favorables. Pour chaque feuille, l'ordonné en dessus de l'axe des abscisses représente les valeurs simulées (Proculture) et observées (Essai) de Bussard (à gauche) en 2000 à Everlange et Reuland et Drifter (à droite) à Everlange en 2002. l'ordonné en dessous de l'axe des abscisses représente les valeurs simulées et observées de Dream (à gauche) en 2000 à Everlange et Reuland et Drifter (à droite) à Everlange en 2002. ....	II-21
2-2-12 : Comparaison des valeurs simulées par Proculture et celles observées à Everlange et Reuland, pour les 5 dernières feuilles de Bussard (variété sensible) et Dream (variété résistante) en 2001. Pour chaque feuille, l'ordonné en dessus de l'axe des abscisses représente les valeurs simulées (Proculture) et observées (Essai) de Bussard en 2001 à Everlange et Reuland. L'ordonné en dessous de l'axe des abscisses représente les valeurs simulées et observées de Dream en 2001 à Everlange et Reuland. ....	II-23
2-2-13 : Résultats du rapport $\Sigma\%$ de la surface foliaire atteinte observée dans les essais / $\Sigma\%$ de la surface atteinte simulée par Proculture (Barre bleue) et le % en valeur absolue de la différence de la moyenne des essais et celles simulées par rapport à celles simulées par Proculture sur les 5 dernières feuilles (courbe). A : Résultats des variétés sensibles et celles qui tendent vers la sensibilité, B : résultats de Dream (variété résistante). ....	II-24
2-2-14 : Début approximatif de la formation des trois étages foliaires de Flair à Everlange en 2000 (A), en 2001 (B) et Reuland en 2000 (C) et 2001 (D). ....	II-27

## REFERENCES

- BAHAT, A., G. HANE, M. B. BROWN & Z. AYAL (1980). "Factors Affecting the vertical Progression of *Septoria* leaf Blotch in short-statured wheats." *Ecology and Epidemiology. The American Phytopathological Society* **70**: (3) 179-184.

- CALAY, F., L. COQUILLART, C. LUCAS, D. LEMAIRE, B. BODSON, J. M. MOREAU & H. MARAITE (2002). Lessons from year 2001 *Mycosphaerella graminicola* epidemic on winter wheat in Belgium. Meded Rijksuniv. Gent Fak. Landbouwk. Toegep. Biol. Wet. **67** (2): 197-204.
- CHEN, R. S. & B. A. MAC DONALD (1996). "Sexual reproduction plays a major role in the genetic structure of populations of the fungus *Mycosphaerella graminicola*." Genetics **142**: 1119-1127.
- COAKLEY, S. M., L. R. MC DANIEL & G. SHANER (1985). "Model for predicting severity of *Septoria tritici* blotch on winter wheat." Phytopathology **75**: 1245-1251.
- ERIKSEN, L., M. W. SHAW & H. OSTERGARD (2001). "A model of the effect of Pseudothetia on genetic recombination and epidemic development in populations of *Mycosphaerella graminicola*." Phytopathology **91**: 240-248.
- EYAL, Z. (1971). "The kinetics of pycnospore liberation in *Septoria tritici*." Can.J.Bot. **49**: 1095-1099.
- GOUGH, F. J. (1978). "Effect of wheat host cultivars on pycnidiospore production by *Septoria tritici*." Phytopathology **68**: 1343-1345.
- HANSEN, J. G., B. J. N. SECHER, L. N. JORGENSEN & B. WELLING (1994). "Oresholds for control on precipitations and growth stage." Plant Pathology **43**: 183-189.
- HUNTER, T., R. R. COKER & D. J. ROYLE (1999). "The teleomorph stage, *Mycosphaerella graminicola*, in epidemics of *Septoria tritici* blotch on winter wheat in the UK." Plant Pathology **48**: 51-57.
- KEMA, G. H. J. & C. H. SILFHOUT (1996). "Histology of the pathogenesis of *Mycosphaerella graminicola* in wheat." Phytopathology **86**: 777-786.
- LOVELL, D. J., S. R. PARKER, T. HUNTER, D. J. ROYLE & R. R. COKER (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.
- MEHDIZADEGAN, F. & F. J. GOUGH (1987). "Partial characterization of compounds produced by *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus licheniformis* antagonistic to *Pyrenophora tritici-repentis*, the cause of wheat tan spot." **77**: pp. 1720.
- MOREAU, J. M. & H. MARAITE (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. & H. MARAITE (2000). "Development of an interaction decision-support system on a web site for control of *Mycosphaerella graminicola* in winter wheat." Bulletin OEPV/EPPQ **30**: 161-163.
- MURRAY, G. M., R. H. MARTIN & B. R. CULLIS (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.
- PARKER, S. R., D. J. LOVELL, D. J. ROYLE & N. D. PAVELEY (1998). Analysing epidemics of *Septoria tritici* for improved estimates of disease risk. Chapter six of "Septoria on cereals : a study of pathosystems". L. J.A., P.Bowyer and H.M.Anderson. Bristol. U.K. IACR - Long Ashton Research Station. ISBN 0 85199269 2. 351 p.
- PAVELEY, N. D., Ed. (1999). Integrating Septoria Risk Variables. *Septoria on Cereals: a study of Pathosystems*. London. CABI Publishing CAB International 351 p. ISBN 0-85199-269-2.
- POLLEY, R. W. & M. R. THOMAS (1991). "Surveys of disease of wheat in England and Wales 1976-1988." Ann. Appl. Biol. **119**: 1-20.
- RAPILLY, F. (1991). Epidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. Epidémiologie en pathologie végétale. L. T. Doc. Paris. Institut National de la Recherche Agronomique INRA. ISBN 2-7380-0297-8. 317 p. pp. 240-261.
- RAPILLY, F. (1992). "Apports de l'épidémiologie à la connaissance de la résistance des végétaux aux agressions parasitaires." Cahiers Agricultures **1**: 239-248.
- ROBERT, C. (2003). Etude et modélisation du fonctionnement d'un couvert de blé attaqué par le complexe parasitaire *Puccinia tritica* - *Mycosphaerella graminicola*. Thèse de doctorat. INRA, Paris-Grignon, 137 p.
- ROBERT, C., M. O. BANCAL & C. LANNOU (2002). "Wheat leaf rust uredospore production and carbon and nitrogen export in relation to lesion size and density." Phytopathology **92**: 762-768.
- ROBERT, C., M. O. BANCAL, P. NICOLAS, C. LANNOU & B. NEY (2004). "Analysis and modelling of effects of leaf rust and *Septoria tritici* blotch on wheat growth." Journal of Experimental Botany **55**, N°399: 1-16.
- ROYLE, D. J. (1991). Potential pest and disease problems associated with arable energy crops. In Wood Fuel for Thought. G. E. E. H. L. Richards. Oxford. pp. 283-294.
- ROYLE, D. J. (1994). "Understanding and predicting epidemics : a commentary based on selected pathosystems." Phytopathology **43**: 777-789.
- ROYLE, D. J., M. W. SHAW & R. J. COOK (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.
- RUBEL, F., P. SKOMOROWSKI & B. RUDOLF (2002). "Verification scores for the operational GPCP-1DD product over the European Alps." Journal of Meteorologische Zeitschrift **11**: 367-370.
- SHAW, M. W. (1987). "Assessment of upward movement of rain splash using a fluorescent tracer method and its application to the epidemiology of cereal pathogens." Plant Pathology **36**: 201-213.
- 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). "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. & D. J. ROYLE (1986). Saving Septoria fungicide sprays : the use of disease forecasts. British Crop Protection Conference - Pest and Diseases. **8 C 33**. pp. 1193-1200.
- SHAW, M. W. & D. J. ROYLE (1989). "Airborne inoculum as a major source of *Septoria tritici* (*Mycosphaerella graminicola*) infections in winter wheat crops in the U.K." Plant Pathology **38**: 35-43.
- SHAW, M. W. & D. J. ROYLE (1993). "Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola*

(*Septoria tritici*) on winter wheat in the U.K." Plant Pathology **42**: 882-899.

STEPHENSON, D. B. (2000). "Use of the "odds ratio" for diagnosing forecast skill." Wea Forecasting **15**: 221-232.

TAVELLA, C. M. (1978). "Date of heading and plant height of wheat varieties, as related to *Septoria* leaf blotch damage." Euphytica **27**: 577-580.

THOMAS, M. R., R. J. COOK & J. E. KING (1989). "Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its affect on yield." Plant Pathology **38**: 246-257.

TYLDESLEY, J. B. & N. THOMPSON (1980). "Forecasting *Septoria nodorum* on winter wheat in England and Wales." Plant Pathology **29**: 9-20.

ZADOKS, J. C., T. T. CHANG & C. F. KONZAK (1974). "A decimal code for the growth stages of cereals weeds." Research **14**: 415-421.

---

## CHAPITRE III

### ÉVALUATION DES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES QUI FAVORISENT L'ÉPIDÉMIE DE LA ROUILLE JAUNE AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG PAR L'UTILISATION DU MODÈLE DE DENNIS (1988).

---

Une évaluation des conditions météorologiques journalières de chaque saison (hiver, printemps, toute l'année, du 10 mai au 10 juillet) a été réalisée pour comprendre l'épidémie de la rouille jaune au Grand-Duché de Luxembourg en 2000 et 2001. La détermination de ces conditions météorologiques a été basée sur deux méthodes: a) la première concerne l'analyse des variations de l'infection pour chaque paramètre d'un modèle d'infection de la rouille jaune ; b) la deuxième concerne, une étude de corrélation entre la fréquence des situations des paramètres météorologiques rencontrés en 2000 et 2001 et l'AUDPC de F1, F2 et F3 (F1 étant la dernière feuille formée).

Ainsi en hiver, c'est l'interaction entre une température comprise entre 4°C et 7°C, une HR > 70 % et la présence de l'eau sur les feuilles qui donne la meilleure corrélation avec l'AUDPC de F1 ( $r = 0.86$ ;  $P < 0.01$ ) et F2 ( $r = 0.78$ ;  $P < 0.05$ ) Cependant, les températures favorables à la maladie pendant la croissance du blé (entre 10 mai et 10 juillet) sont comprises entre 7°C et 15°C. Ces températures doivent être associées avec une humidité relative supérieure à 70 % et la présence de l'eau liquide sur les feuilles. Les températures inférieures à 4°C et supérieures à 16°C sont défavorables au développement de la maladie.

---

#### I- Introduction

La rouille jaune est causée par *Puccinia striiformis* Westend qui est un champignon parasite biotrophe dit aussi « obligatoire » car il ne peut se développer que sur des tissus vivants de la plante (DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 2000b). Le cycle de vie de *P. striiformis* semble limité seulement aux stades urédénial et téliial.

L'épidémie de la rouille jaune a été analysée au Grand-Duché de Luxembourg pendant au moins trois années d'observations (de 1999 à 2001).

Cette maladie est capable de s'étendre sur de grandes surfaces pendant des périodes très courtes parce qu'elle est principalement dispersée par voie de nombreuses spores microscopiques, asexuées dicaryotiques qui sont les urédospores (SACHE, 2000).

Les conditions environnementales pendant le printemps et le début de l'été sont les facteurs contribuant le plus à la production de spores. Les énormes quantités de spores produites sont prêtes à être enlevées de la plante hôte et à être transportées à des

échelles allant de quelques centimètres à des milliers de kilomètres avant, d'être finalement déposées sur une autre plante hôte appropriée (SACHE, 2000). L'efficacité de l'infection et de la germination des urédospores dépend des facteurs microclimatiques limitant, principalement la température et l'humidité de l'air [l'humidité, particulièrement la durée d'humectation qui se classe comme le facteur dominant suivi par la température (HUBER & GILLESPIE, 1992)] et la présence d'eau liquide sur les feuilles ainsi que l'intensité lumineuse. Cependant, selon BURRAGE (1969), les urédospores germent mal dans l'eau libre mais exigent une humidité relative proche de la saturation qui aboutit à la formation de gouttelettes de condensation. L'humidité relative proche du niveau de condensation doit durer au moins 3 heures avant la germination (TU & HENDRIX, 1967). La durée d'humectation minimale nécessaire à l'infection est de 4 heures à la température optimale et peut se prolonger jusqu'à 16 heures sous des conditions limitantes de température. Les spores de *P. striiformis* sont incapables de survivre si une période sèche arrive entre la germination des urédospores et la pénétration (DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 1995).

Le pourcentage des urédospores de *P. striiformis* qui germent décroît au fur et à mesure que le temps d'exposition lumineuse s'accroît (MADDISON, 1970 ; MADDISON, 1972 ; RAPILLY, 1991 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 2000c).

De nombreuses études ont été réalisées sur la rouille jaune pour améliorer les connaissances générales sur cette maladie (BURRAGE, 1969 ; DENNIS, 1988 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 1994 ; SACHE, 2000). L'étude de l'interaction entre les valeurs-seuils des conditions météorologiques permettant l'installation et le développement de la maladie n'a jamais été réalisée. En effet, il n'existe aucune étude dans la littérature qui aborde les limites des paramètres météorologiques favorisant le développement de la rouille jaune. DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, (1994) ont réalisé une étude comparative des effets de la température et de la durée d'humectation sur la germination, la pénétration et l'infection de *P. striiformis*. Mais l'étude réalisée par ces auteurs se limite à l'effet individuel de chaque paramètre sur l'infection sans approfondir la question de l'interaction entre les paramètres et la relation de leur variation avec la maladie observée.

L'objectif de ce chapitre est de procéder à une évaluation critique des principaux paramètres météorologiques qui ont favorisé le développement de l'épidémie de *P. striiformis* au Grand-Duché de Luxembourg. Les paramètres qui ressortiront de cette étude seront utilisés dans la mise en place d'un système d'avertissement pour cette maladie au Grand-Duché de Luxembourg.

## II- Matériels et méthodes

La réalisation de cette étude a été basée sur deux points principaux : a) détermination des conditions météorologiques potentiellement favorables au développement de la maladie par l'utilisation du modèle de DENNIS (1988) pour l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées au Luxembourg ; b) validation de l'approche par une étude de corrélation entre la fréquence d'observation de paramètres météorologiques déterminés pendant trois périodes (hiver, printemps, période critique de croissance du blé) et l'AUDPC calculé pour F3, F2 et F1.entre GS71 et GS77 (ZADOKS *et al.*, 1974).

## Conception de la méthode

La durée d'humidité nécessaire à la germination dépend de la température. En présence d'une période humide proche de la saturation, l'intervalle de températures nécessaire à l'infection et à la germination varie selon les auteurs (tableau 2-3-1).

**Tableau 2-3-1 : Principales conditions de températures favorables aux principales phases du cycle de base de *P. striiformis***

Phase	Température minimale (°C)	Température optimale (°C)	Température maximale (°C)	Eau liquide	Auteurs
Germination	2	7	15	Oui	SHARP (1964)
	4	-	25	-	ZADOKS & RIJSDIJK (1972)
	-2,8	9.7	21.7	Oui	SCHMITT <i>et al.</i> , (1964)
	5	8-12	16	oui	DE VALLAVIEILLE-POPE <i>et al.</i> , (1995); DE VALLAVIEILLE-POPE <i>et al.</i> , (2000A)
Pénétration	5	8	12	Oui	DE VALLAVIEILLE-POPE <i>et al.</i> , (1995); DE VALLAVIEILLE-POPE <i>et al.</i> , (2000)
	- 4	7-10	18	oui	DENNIS (1988)
Sporulation	5	12-15	20	non	DE VALLAVIEILLE-POPE <i>et al.</i> , (1995);

Nous étudierons l'impact de la variation de la température et de la durée d'humectation sur le processus d'infection de *P. striiformis* au Grand-Duché de Luxembourg en utilisant le modèle DENNIS (1988). La relation entre la température (T), la durée de la période humide (w) et l'infection (I) est décrite par l'équation suivante :

$$I = -355.14 + 0.99 T + 1.64 T^2 - 0.11 T^3 + 292.99 (\ln(w)) - 48.26 (\ln(w))^2 - 1.55 T \times (\ln(w))$$

Une étude de sensibilité du modèle de DENNIS (1988) a été jugée indispensable pour déterminer la gamme de températures et la durée de la période humide qui favorisent l'infection du blé d'hiver par *P. striiformis*. La spécification de chaque gamme est subjective, mais pourrait être réalisée avec quelques justifications par des arguments physiques ou des expériences. Notre méthode pour cette analyse consiste en l'utilisation, d'un grand nombre de données d'entrée du modèle pour chaque variable météorologique reprise comme inputs du modèle. Les données de température sont prises d'une façon aléatoire dans l'intervalle (0°C, 33°C) pendant le printemps et le début de l'été. Les données de la période d'humectation sont prises dans un intervalle compris entre 1 heure et 33 heures. Ces gammes de température et durée d'humectation ont été choisies en fonction des conditions rencontrées au Grand-Duché de Luxembourg à ces périodes. Pour cette étude de sensibilité sur des températures et des périodes humides, 10000 valeurs aléatoires ont été produites selon une distribution uniforme. Ce grand nombre de données d'entrée vise à consolider les caractéristiques stochastiques de l'approche.

Parallèlement à cette étude de sensibilité, nous avons réalisé une étude de corrélation entre la fréquence des situations (%) des paramètres météorologiques rencontrées en 2000 et 2001 et l'AUDPC (SHANER & FINNEY, 1977) de F1, F2 et F3 (la dernière feuille est F1) de Flair enregistrée à Everlange, Reuland et Emerange. Cette fréquence de situations météorologiques rencontrées est calculée sur quatre périodes (hiver,

---

printemps, toute l'année, du 10 mai au 10 juillet). Les situations météorologiques retenues exprimées sous forme de classes sont les suivantes :

- Présence de pluie pour trois intervalles d'humidité relative (RH > 70 %, RH > 80 %, RH > 90 %) et pour quatre intervalles de température (4°C < t°C < 7°C, 7°C < t°C < 15°C, 15°C < t°C < 16°C, t°C > 16°C) ;
- Absence de pluie, RH < 70 %, t°C > 15°C ;
- 4°C < t°C < 7°C sans prendre en considération la pluie et l'humidité relative ;
- 7°C < t°C < 15°C sans prendre en considération la pluie et l'humidité relative ;

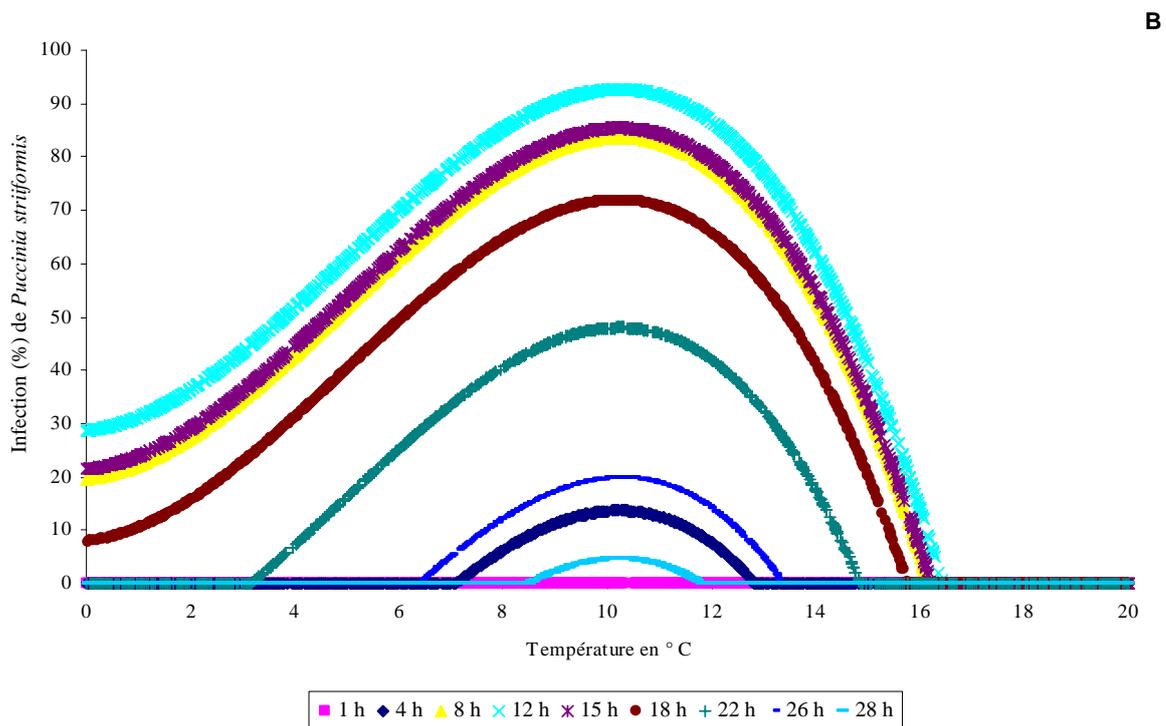
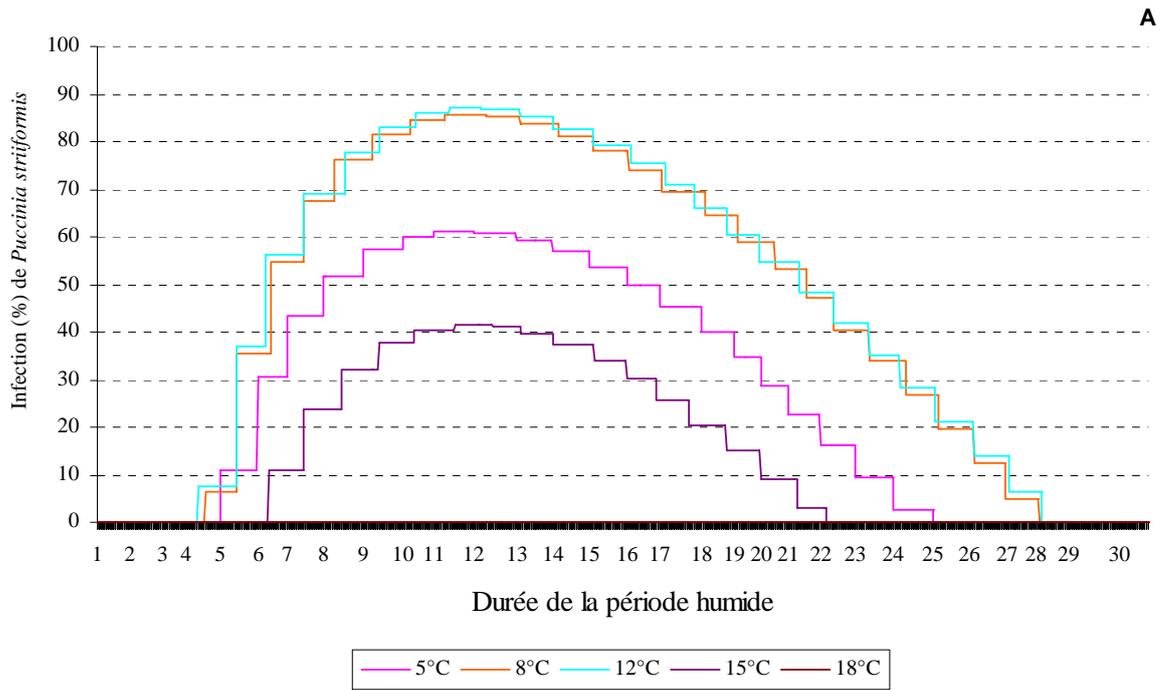
Au total, quinze classes ont été retenues. Une classe représente une situation météorologique donnée.

Enfin, cette analyse a été effectuée en utilisant les données météorologiques journalières d'Everlange, de Reuland et d'Obercorn.

### III. Résultats

L'analyse a donné les résultats suivants :

- La classe de températures favorable à l'infection se situe entre 2°C et 16°C avec un optimum entre 8°C et 12°C (figure 2-3-1). Cependant, des températures supérieures à 16°C inhibent le processus d'infection par *P. striiformis*. En effet, l'étude de la variation de l'infection (DENNIS, 1988) pour chaque température en fonction de la période humide (figure 2-3-1, A) a révélé qu'au-delà de 18°C, aucune infection n'est possible.
- La période humide minimale nécessaire à l'infection du blé d'hiver par *P. striiformis* est de 4 heures. L'optimum se situe entre 8 et 18 heures. L'étude de la variation de l'infection (DENNIS, 1988) pour chaque période humide en fonction de la température (figure 2-3-1, B) a montré que l'infection est impossible pour les périodes humides de 1 heure et au-delà de 28 heures quelle que soit la valeur de la température.

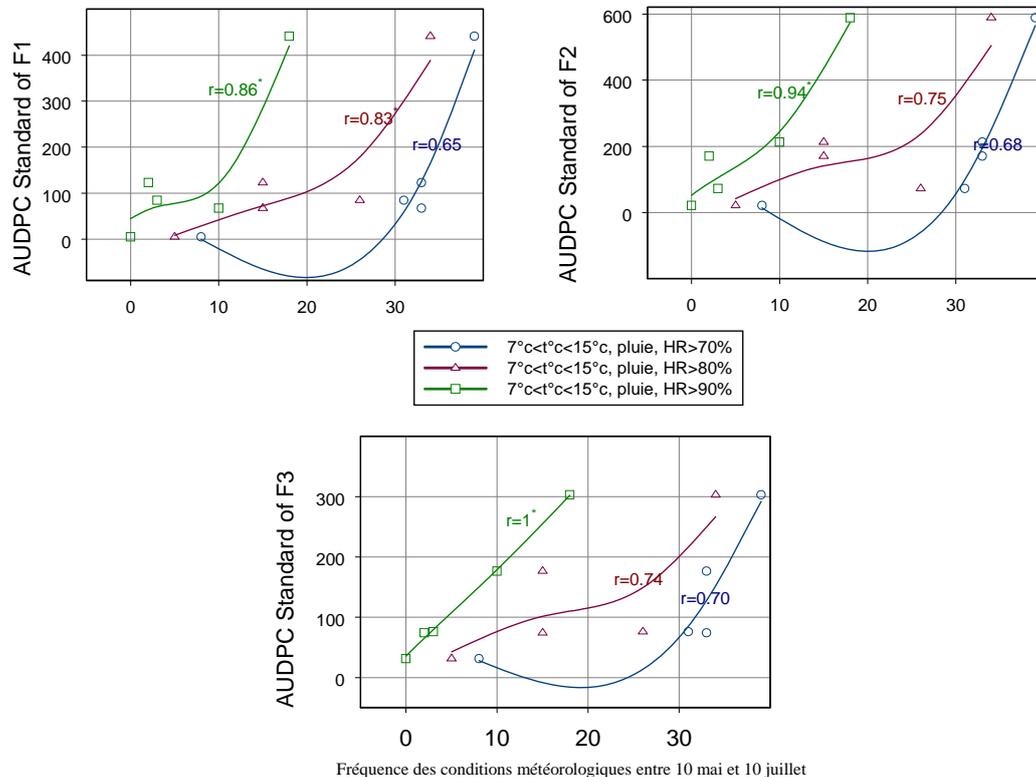


**Figure 2-3-1 : Evaluation des paramètres météorologiques par le modèle de Dennis (1988). A : Variation de l'infection en fonction de la durée de la période humide pour chaque température. B : Variation de l'infection en fonction de la température pour chaque période humide.**

## IV. Discussion

Le succès d'infection de *Puccinia striiformis* est plus important à 5 °C qu'à 15°C quelque soit la durée d'humectation. Une température de 18°C inhibe complètement l'infection quelque soit la durée de la période humide (figure 2-3-1, A).

Notre étude de corrélation (figure 2-3-2, tableau 2-3-2) confirme les résultats de l'analyse.



**Figure 2-3-2: Corrélation entre AUDPC de F1, F2 et F3 et la fréquence de conditions météorologiques déterminées pendant les années 2000 et 2001 à Everlange, Reuland et Obercorn. Légende : la fréquence représente le nombre d'heures (%) de chaque condition (par exemple : 7°C < température < 15°C associé à une pluie et H.R. > 70%) par rapport à la période entre le 10 mai et le 10 juillet.**

**Tableau 2-3- 2 : Corrélations entre les conditions météorologiques données et AUDPC de F1, F2 et F3 enregistrés à Everlange, Reuland et Emerange en 2000 et 2001.**

(\*)  $P < 0.05$  ; (\*\*)  $P < 0.01$

	4°C < t°C < 7°C		7°C < t°C < 15°C		15°C < t°C < 16°C			T > 16°C
	Hiver	Printemps	Hiver	printemps	Entre 10 Mai et 10 juillet			Non
Pluie	Oui							
RH%	> 70 %				> 80 %	> 90 %	< 70 %	
<b>F1</b>	0.86**	0.2	- 0.2	0.7*	0.4	0.9**	0.2	- 0.3
<b>F2</b>	0.78*	0.1	- 0.4	0.5	0.5	0.9**	0.5	- 0.3
<b>F3</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>	<b>- 0.6</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.9**</b>	<b>0.7*</b>	<b>- 0.4</b>

Les conditions météorologiques qui favorisent la maladie sont variables selon la période considérée :

- Hiver : l'AUDPC de F1 et F2 (calculée dans les trois sites en 2000 et 2001) est corrélé avec des températures comprises entre 4°C et 7°C, une humidité relative supérieure à 70 %, la présence de l'eau. L'épidémie de rouille jaune est favorisée par un hiver doux et humide. Des températures supérieures à 7°C

agissent défavorablement sur le développement de la rouille jaune (r compris entre -0.75 pour F1 à -0.86 pour F3,  $P < 0.05$ ) ;

- Printemps : des températures comprises entre 7°C et 15°C, une humidité relative supérieure à 70 %, la présence de pluie. Les températures inférieures à 4°C agissent défavorablement sur le développement de la maladie (r compris entre -0.8 pour F1 et -0.9 pour F3,  $P < 0.05$ ) ;
- Entre le 10 mai (GS33-GS37, ZADOKS *et al.*, 1974) et le 10 juillet (GS77-GS85) : des températures comprises entre 7°C et 15°C. La corrélation est plus forte ( $P < 0.01$ ) pour une humidité supérieure à 80 % et à 90 % que pour une humidité supérieure à 70 %. Les températures supérieures à 16°C sont inhibitrices pour la maladie.

Ainsi, les observations de terrain ont permis de vérifier le bon fonctionnement du modèle de DENNIS (1988) pour les conditions météorologiques qui influencent la rouille jaune au Grand-Duché de Luxembourg.

#### **IV. Conclusion**

La conceptualisation quantitative et qualitative de la rouille jaune du blé d'hiver causée par *P. striiformis* au Grand-Duché de Luxembourg a permis de définir les conditions météorologiques qui favorisent cette maladie dans ce pays.

Cette étude a permis d'évaluer pour chaque saison les conditions météorologiques journalières qui favorisent l'épidémie de la rouille jaune au Grand-Duché de Luxembourg. Une étude détaillée sur les conditions météorologiques horaires à l'échelle de chaque décade est développée dans le chapitre IV.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

- 2-3-1 : Principales conditions de températures favorables aux principales phases du cycle de base de *P. striiformis*..... III-3  
 2-3-2 : Corrélations entre les conditions météorologiques données et AUDPC de F1, F2 et F3 enregistrés à Everlange, Reuland et Emerange en 2000 et 2001. .... III-6

## FIGURES

- 2-3-1 : Evaluation des paramètres météorologiques par le modèle de Dennis (1988). A : Variation de l'infection en fonction de la durée de la période humide pour chaque température. B : Variation de l'infection en fonction de la température pour chaque période humide..... III-5  
 2-3-2 : Corrélations entre AUDPC de F1, F2 et F3 et la fréquence de conditions météorologiques déterminées pendant les années 2000 et 2001 à Everlange, Reuland et Obercorn. .... III-6

## REFERENCES

- BURRAGE, S. W. (1969). "Dew and the growth of the uredospore germ tube of *Puccinia graminis* on the wheat leaf." *Ann. Appl. Biol.* **64**: 495-501.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., L. HUBER, M. LECONTE & H. GOYAU (1994). "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." *The American Phytopathological Society* **85**: (4) 409-415.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., L. HUBER, M. LECONTE & H. GOYAU (1995). "Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration and infection of *P. recondita* f. sp. *tritici* and *P. striiformis* on wheat seedlings." *Phytopathology* **85**: (4) 409-415.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., J. ROUZET, M. LECONTE, M. DELORS & M. N. MISTON (2000a). "La rouille jaune du blé en France. Des épidémies déclenchées par une nouvelle race, un hiver doux et un printemps humide." *Phytoma. La défense des végétaux* **527**: 22-29.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., S. GIOSUC, L. MUNK, A. C. NEWTON, R. E. NIKS, H. OSTERGARD, J. PONS-KUHNEMANN, V. ROSSI & I. SACHE (2000b). "Evaluation de paramètres épidémiologiques et leur utilisation dans les épidémies et les modèles de prédiction de maladies de céréales aéroportées." *Agronomie* **20**: 715-727.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., S. GIOSUC, L. MUNK, A. C. NEWTON, R. E. NIKS, H. OSTERGARD, J. PONS-KUHNEMANN, V. ROSSI & I. SACHE (2000c). "Assessment of epidemiological parameters and their use in epidemiological and forecasting models of cereal airborne disease." *Agronomie* **20**: 715-727.
- DENNIS, J. I. (1988). "Temperature and wet-period conditions for infection by *Puccinia striiformis* F.sp. *tritici* race 104E137A+." *Trans.Br.Mycol.Soc.* **1**: 91-96.
- HUBER, L. & T. Z. GILLESPIE (1992). "Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology." *Annu. Rev. Phytopathology* **30**: 553-577.
- MADDISON, A. C. (1970). *Some aspects of the epidemiology of *Puccinia striiformis* west. with special reference of the effect of U.V. radiation on long distance transport.* PHD thesis. Southampton.
- MADDISON, A. C. (1972). "Sunlight and viability of cereal rust uredospores." *Trans.Br.Mycol.Soc.* **59**: 429-443.
- RAPILLY, F. (1991). *Epidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. Epidémiologie en pathologie végétale.* L. T. Doc. Paris. Institut National de la Recherche Agronomique INRA. ISBN 2-7380-0297-8. 317 p. pp. 240-261.
- SACHE, I. (2000). "Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain." *Agronomie* **20**: 757-767.
- SCHMITT, C. G., J. W. HENDRIX, R. G. ENGE & N. W. JONES (1964). *Stripe rust, *Puccinia striiformis*.* Fort Detrick. West.Tech.Rept. **43**, pp. 111.
- SHANER, G. & R. E. FINNEY (1977). "The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in knox wheat." *Phytopathology* **67**: 1051-1056.
- SHARP, E. L. (1964). "Prepenetration and Postpenetration Environment and Development of *Puccinia striiformis* on wheat." *Journal series* **653**: 198-203.
- ZADOKS, J. C. & F. H. RIJSDIJK (1972). "Epidemiology and forecasting of cereal rust studied by means of a computer simulator named EPISEM." **10**: 293-296.
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG & C. F. KONZAK (1974). "A decimal code for the growth stages of cereals weeds." *Research* **14**: 415-421.

---

**CHAPITRE IV**
**SIMULATION DE LA ROUILLE JAUNE DU BLÉ D'HIVER  
AU GRAND-DUCHÉ DU LUXEMBOURG**

 Calibration et Validation
 

---

Des épidémies de rouille jaune du blé d'hiver causée par *Puccinia striiformis* se sont développées entre 1999 et 2001 à Everlange et Reuland. Des simulations basées sur sept algorithmes ont été développées en fonction des conditions météorologiques des stations proches des deux sites. La phase de calibration consiste à déterminer les paramètres météorologiques qui ont favorisé l'épidémie de cette maladie en 2000 et 2001. Les occurrences statistiques basées sur la fréquence de la présence horaire de chaque paramètre à l'échelle de la décade ont révélé une importance de la température supérieure à 4°C associée à une humidité supérieure à 92 % pendant au moins quatre heures au seuil de fréquence de 15 % (CSI = 0.85, POD = 0.92 et FAR = 0.08) et une humidité supérieure à 92 % pendant au moins huit heures au seuil de fréquence de 10 % (CSI = 0.78, POD = 0.84 et FAR = 0.08). Une pluie inférieure ou égale à 1 mm est indispensable au début de l'épidémie pour déposer les spores. La latence relative aux sorties du principal algorithme a été calculée par la formule

$$\frac{1}{p} = \frac{2.5 + 5.65T}{1005 + 11.3T} \quad (p = \text{période de latence, } T = \text{température}$$

moyenne journalière). Le meilleur ajustement ( $r = 0.9$ ,  $P < 0.05$ ) a été réalisé par l'algorithme relatif à une température comprise entre 4°C et 16°C pendant au moins 48 heures consécutives et une humidité relative supérieure à 92 % pendant au moins 4 heures.

---

**I. Introduction**

La progression au champ d'une épidémie de rouille jaune causée par *Puccinia striiformis* est le résultat d'interactions complexes entre la croissance de la population parasite, celle du peuplement végétal hôte, et les facteurs climatiques qui influencent les deux partenaires biologiques "de l'interaction hôte parasite" (SACHE, 2002). De plus, l'implication simultanée d'échelles spatiales et temporelles différentes dans un même phénomène, la dispersion des spores, et sa conséquence principale, l'extension spatiale de la maladie (MAC CARTNEY & FITT, 1998), doivent être prises en compte (SACHE, 2002). La dispersion spatiale de la maladie dépend de la sensibilité des spores aux agents climatiques et des conditions climatiques nécessaires à l'infection (SACHE, 1994 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 2000 ; SACHE, 2000). GREGORY (1968) distingue un certain nombre de principes qui s'appliquent aux gradients de dispersion de la rouille jaune : a) un gradient de dispersion implique une source locale d'inoculum ; b) un gradient de dispersion implique une population d'hôtes susceptibles ; c) la diffusion secondaire aplanit un gradient primaire ; d) quand l'incidence de maladies est exprimée comme une fraction d'individus infectés, la transformation d'infections multiples doit être appliquée.

La libération des spores de rouille, présentes en équilibre instable au sein de lésions ouvertes à la surface des feuilles, est de type passif et fait intervenir essentiellement le vent et la pluie (SACHE, 2002). Les spores de rouille jaune sont libérées difficilement par le vent. En effet, la forme du gradient de dispersion de *P. striiformis* est influencée par

les conditions d'humidité relative. Plus celle-ci est élevée, plus les unités de dissémination sont constituées d'amas de spores adhérant entre elles. A faible humidité relative, la majorité des unités de dissémination est formée d'une seule spore (RAPILLY, 1977 ; RAPILLY, 1991). Le déclenchement matinal de la libération est plus tardif chez la rouille jaune, dont les lésions mucilagineuses semblent devoir être exposées plus longtemps au soleil avant d'être complètement sèches et pouvoir libérer les spores qu'elles contiennent (SACHE, 2002). Le vent ne constitue pas un facteur limitant pour la libération des spores, qui s'effectue régulièrement sur une base quotidienne pendant toute la durée de l'épidémie (SACHE, 2000). La pluie intervient, très localement, sous forme d'épisodes de durée et intensités variables, souvent intermittentes (SACHE, 2000 et 2002). Chaque épisode pluvieux provoque quasi-instantanément une libération massive de spores. Les épisodes se différencient par rapport à la libération ultérieure des spores, qui n'est pas modifiée par une pluie de basse intensité, mais est presque nulle suite à une pluie de forte intensité (GEAGEA *et al.*, 1999). Une forte pluie est capable d'épuiser le stock de spores disponible dans les lésions (SCHAFFNIT, 1909 *in* SACHE, 2002), qui ne recommenceront à produire des spores qu'à l'issue d'une période sans pluie nécessaire au séchage des lésions (CHESTER, 1946 ; GEAGEA *et al.*, 1999 ; GEAGEA *et al.*, 2000; SACHE, 2002 ). La pluie semble être l'agent essentiel de dépôts de spores (MAY, 1958) qui peuvent sans cela rester très longtemps en suspension dans l'air de par leur très faible masse.

Si les conditions microclimatiques favorables au processus d'infection au Grand-Duché de Luxembourg sont maintenant bien connues (EL JARROUDI *et al.*, 2004), l'étude de l'interaction de la durée de chaque paramètre météorologique et son importance en terme d'efficacité de l'infection n'a jamais été abordé.

L'objectif de ce chapitre est de proposer un modèle de simulation de la rouille jaune au Grand-duché du Luxembourg. Ce modèle sera un module complémentaire au système d'avertissement Proculture mis en place pour la simulation de la septoriose des feuilles causée par *S. tritici*.

## II. Matériels et méthodes

### II.1. Méthodes de calibration

Sur base de notre étude sur les paramètres météorologiques favorisant l'infection de la rouille jaune au Grand-Duché de Luxembourg (EL JARROUDI *et al.*, 2004), nous avons testé sept algorithmes. Les conditions de température sont similaires pour l'ensemble des algorithmes [ $4^{\circ}\text{C} < \text{température de l'air} < 16^{\circ}\text{C}$  pendant au moins 25 heures] à l'exception de l'algorithme 7 qui correspond aux conditions de (DENNIS, 1988) [ $2 < \text{température} < 18^{\circ}\text{C}$  et période humide d'au moins 4 heures]. Les six autres algorithmes se différencient par des intervalles et une durée variables pour la pluie et l'humidité relative (tableau 2-4-1).

Nous avons développé des simulations de l'infection de chaque algorithme décrit ci-dessus en utilisant les données météorologiques d'Everlange et d'Hersberg (proche de Reuland) en 2000 et 2001.

En proposant ces algorithmes nous sommes confrontés à une double difficulté. D'une part, le problème de l'efficacité d'un algorithme par rapport à un autre et d'autre part, le problème de validation. L'algorithme 2 englobe toutes les conditions de l'algorithme 1 et de l'algorithme 3.

**Tableau 2-4-1 : Les limites d’humidité relative et de la pluie fixées pour chaque algorithme sur base de la littérature (SACHE, 1994 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 2000 ; SACHE, 2000). et des résultats du chapitre 2 III.**

	Humidité relative		Pluie		
	Minimale (%)	Durée (h)	Présence	intensité (mm)	Durée (h)
Algorithme 1	92	4	non	-	-
Algorithme 2	75	18	non	-	-
Algorithme 3	85	10	non	-	-
Algorithme 4	92	4	oui	0.1	2
Algorithme 5	60	24	oui	0.1	2
Algorithme 6	85	10	oui	0.1	2

La rouille jaune est une maladie très complexe et difficile à ajuster. Aborder l’efficacité de l’infection et les paramètres qui la favorisent constitue une grande contrainte et une alternative pour juger tel ou tel algorithme. Trois conditions doivent se réunir pour affronter cette problématique : a) la présence de l’inoculum; b) la présence d’une variété susceptible ; c) la présence et la connaissance des conditions météorologiques favorables à la maladie.

Pour résoudre cette problématique, nous avons jugé qu’il est indispensable de procéder pas à pas pour déterminer les paramètres prépondérants qui ont favorisé la rouille dans trois sites d’Everlange, Reuland et de la Moselle pendant les années 2000 et 2001. Ensuite, il s’agit de spécifier, par les occurrences statistiques, le seuil minimal favorable à l’infection. Pour ceci, nous avons scindé notre étude en quatre parties. La première consiste à analyser la fréquence de conditions d’humidité, température et précipitations dans différentes classes telles que décrites au tableau 2-4-2 au cours des périodes ayant un intérêt pour le suivi de la maladie.

**Tableau 2-4-2: Les paramètres analysés à différents intervalles en 2000 et 2001 à Everlange (Données météorologiques horaires d’Everlange en 2000 et d’Useldange en 2001), Reuland (Données météorologiques d’Hersberg) et la Moselle (Données météorologiques de Findel).**

Paramètre	Classes d'humidité (H)	Classes de température (T)	Classes de pluie (P) en mm
	75%>H>60%	4°C>T>0°C	P = 0
	85%>H>75%	8°C>T>4°C	1>P>0
	92%>=H>85%	12°C>T>8°C	5>P>1
Intervalle	H>=80%	16°C>T>12°C	P>5
	H>=92%	16°C>T>8°C	
		16°C>T>4°C	
		18°C>T>16°C	
		22°C>T>18°C	

La deuxième partie consiste à combiner l’intervalle prépondérant de la température avec les différentes classes d’humidité citées ci-dessus avec en plus la classe d’humidité

inférieure à 60 %. Pour chaque classe proposée, nous avons calculé la fréquence d'occurrence (toutes les heures de présence sont prises en compte sans aucune limite) pour les trois décades de mai et juin en 2000 où la maladie était très précoce. Dans la Moselle, en 2001, la maladie a été observée début mai. Pour comprendre les conditions météorologiques de la Moselle qui étaient à l'origine de cette apparition précoce de la maladie, nous avons inclus les trois décades d'avril à notre analyse (en plus de celles de mai, juin et les deux premières décades de juillet).

Dans la troisième partie, nous avons adopté la même procédure que dans la deuxième partie avec des restrictions. Nous avons calculé la fréquence de la présence horaire à l'échelle de la décade de chaque classe d'humidité combinée à la principale classe de température. Toutefois, dans cette partie, cette fréquence a été complétée par le comptage du nombre d'heures consécutives de présence à l'échelle de la décade. Ainsi, nous avons testé deux conditions : a) fréquence des intervalles avec au moins 4 heures consécutives ; b) fréquence des intervalles avec au moins 8 heures consécutives. Ensuite, nous avons superposé la maladie observée sur les cinq dernières feuilles et les fréquences calculées. Cette superposition nous a permis de déterminer le meilleur seuil à prendre en considération pour chacune des deux conditions citées ci-dessus pour expliquer la maladie.

Enfin, la quatrième partie dépend directement de la troisième pour proposer un modèle de simulation de la rouille jaune à l'échelle du Grand-Duché de Luxembourg. Les résultats des occurrences statistiques calculés dans la troisième partie permettront de déduire l'algorithme qui explique le mieux la maladie. Nous calculerons ensuite le nombre de périodes de latence de cet algorithme en 2000 et 2001.

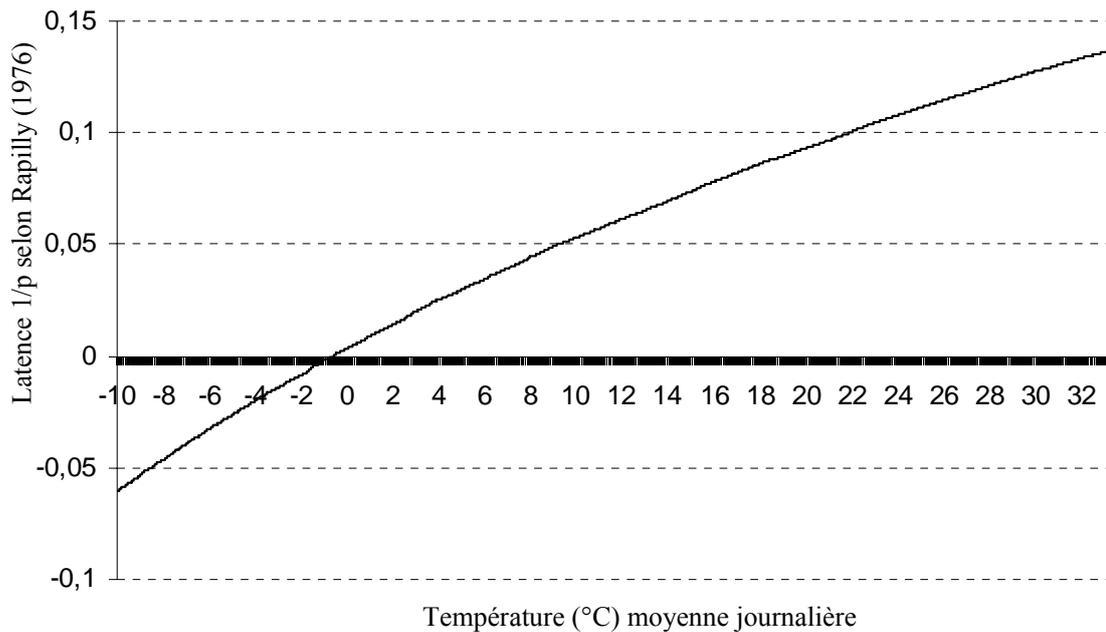
### II.1.1. Période de latence

En 1961, ZADOKS décrit une formule donnant la durée de latence de *P. striiformis* en fonction de la température (ZADOKS, 1961). Cependant, cette formule proposée par ZADOKS (1961) ne permet qu'un classement assez médiocre des années présentant des attaques de *P. striiformis* (ROUZET, 1995). Cette formule a été aménagée par RAPILLY (1976) pour améliorer sa précision:

$$\frac{1}{p} = \frac{2.5 + 5.65T}{1005 + 11.3T}$$

Où p = période de latence, T = température moyenne journalière.

Nous avons analysé les limites de sensibilité de cette formule aménagée par RAPILLY (1976) pour déterminer les seuils de température qui agissent sur ce modèle (figure 2-4-1). Cette étude a permis de dégager des sensibilités de la fraction de temps de latence en fonction de quatre classes de températures : a) Le développement du parasite est très affecté et risque d'être stopper pour les températures moyennes journalières inférieure à -10°C (SHRUM, 1975; RAPILLY & JOLIVET, 1976). Pour la latence, l'avance acquise sur le temps de sporulation est annulée; b) Les températures comprises entre 0 et - 10°C sont inhibitrices mais n'arrêtent pas le développement du parasite tant que les températures ne descendent pas en dessous de - 10°C (RAPILLY, 1976; SHRUM, 1975). La fraction de temps de latence (1/p) accomplie est retranchée de la somme des fractions de latence déjà calculées; c) la fraction de temps de latence (1/p) est nulle ou tend vers zéro pour les températures moyennes journalières comprises entre 0 et 4°C; d) La fonction de latence (1/p) effectuée est ajoutée aux précédentes pour les températures supérieures à 4°C.



**Figure 2-4- 1 : Les limites du modèle de latence (RAPILLY, 1976) concernant les températures rencontrées au Grand-Duché de Luxembourg (-10 à 33°C).**

Nous avons calculé la latence correspondant aux simulations des infections pour l'algorithme de choix issu de la calibration.

## II.2. Méthodes de validation

Notre méthodologie de validation est basée sur le calcul des scores statistiques extraits de tables de contingence. Ces dernières ont été déterminées en superposant les données d'observations aux fréquences d'occurrence à l'échelle décadaire des différentes classes des paramètres météo du tableau 2-4-2 observés pour minimum 4 heures consécutives et pour minimum 8 heures consécutives. La maladie est exprimée par l'AUDPC calculé pour chaque décade. Sur base d'un test ANOVA pour  $\alpha$  de 5 %, nous avons établi un tableau à code binaire d'évolution de la maladie (1) et sans aucune évolution (0). Grâce à ce tableau de référence, nous avons pu calculer les scores statistiques de chaque intervalle et pour chaque seuil : a) simulé et observé (O & S) ; b) simulé et non observé (S & NO) ; c) non simulé mais observé (NS & O). Les différents résultats ont été jugés par trois scores statistiques POD (Probability of detection of "Yes" observations), FAR (False alarm ratio) et CSI (Critical success index) (tableau 2-4-3).

Une étude de régression a été réalisée entre le nombre de périodes de latence issue de l'algorithme choisi et la maladie exprimée sur les deux dernières feuilles dans les sites d'essais en 2000 et 2001.

**Tableau 2-4-3: Méthodes de calculs de scores et des occurrences statistiques. Légende: O = observée; S = simulée; NO = non observée; NS = non simulée.**

	Observations			
		O	NO	Total Simulées
Simulations	S	O & S = H (hits)	NO & S = F (false alarms)	FAR = F/H+F
	NS	O & NS = M (misses)		
	Total observées	POD = H/H+M		CSI = H/H+F+M

### III. Résultats

#### III.1. Calibration

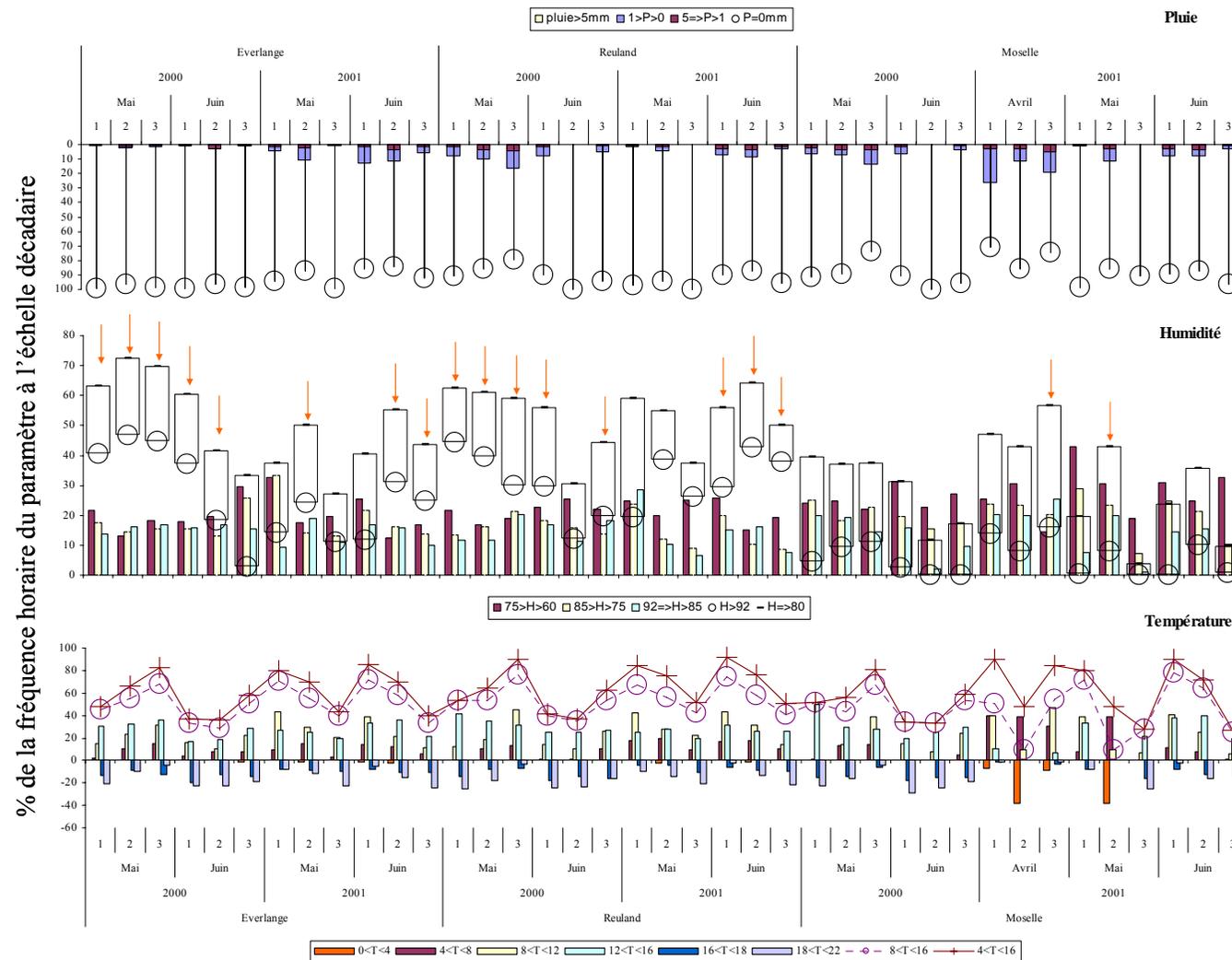
##### III.1.1. Evaluation des paramètres météorologiques (Partie I)

La fréquence de la pluie est très importante pour la rouille jaune et c'est un paramètre limitant dans l'efficacité de l'infection. Ainsi, dans les trois sites d'essais (figure 2-4-2), la fréquence de l'absence de la pluie avoisine 100 % pendant les décades de mai et juin. Lorsque cette pluie existe, la fréquence qui domine est celle avec une intensité ne dépassant pas 1 mm/heure.

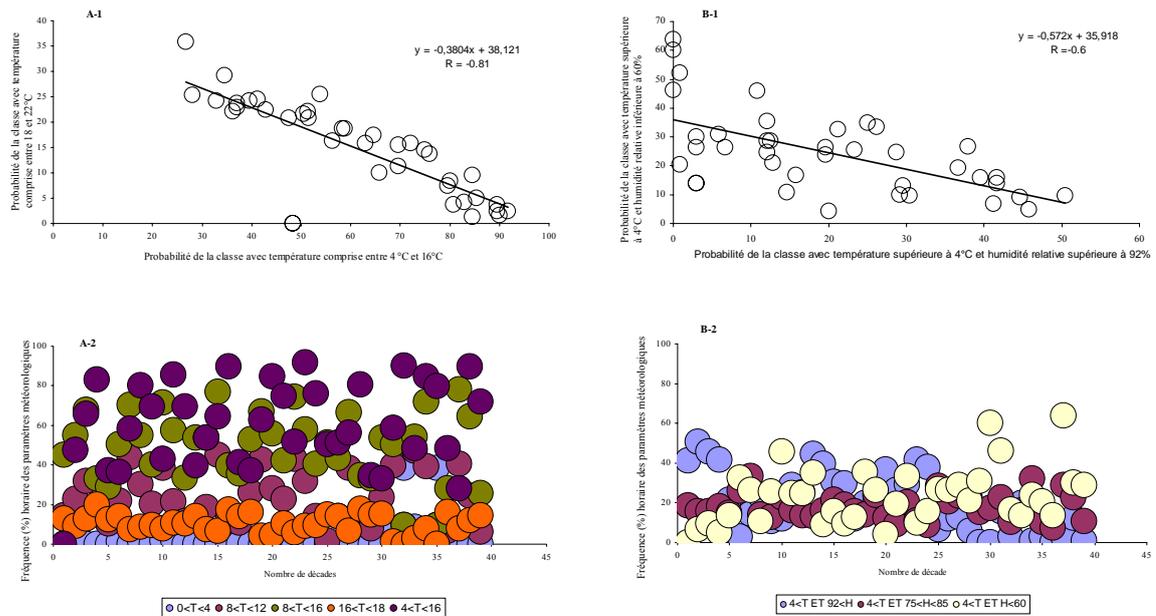
Les pluies avec une intensité supérieure à 5 mm étaient quasi-inexistantes. Donc, le premier résultat provisoire de cette étude est que l'épidémie de la rouille jaune a été favorisée par l'absence de la pluie ou des fréquences très négligeables avec une intensité ne dépassant pas 1 mm/heure.

Pour l'humidité relative (figure 2-4-2), la fréquence qui domine pendant les trois décades de mai et la 1<sup>ère</sup> décade de juin en 2000 (pendant laquelle la maladie a été enregistrée) à Everlange et Reuland et en juin 2001 est celle avec une humidité supérieure à 92 % ou une humidité supérieure à 80 %. En tous cas, les trois classes d'humidité entre 60 et 75 %, entre 75 et 85 % et entre 85 et 92 % sont négligeables par rapport à celles avec une humidité supérieure à 92 %. Par conséquent, la classe d'humidité la plus importante pour le développement de la maladie semble être celle avec une humidité supérieure à 92 %.

L'analyse de la température a révélé une importance de deux classes, la première avec une température comprise entre 12 et 16°C et la seconde avec une température comprise entre 8 et 12 °C (figure 2-4-2). La classe comprise entre 4 et 8°C a été très négligeable et celle entre 0 et 4°C est presque nulle pendant les deux années de l'épidémie de la rouille (figure 2-4-3).



**Figure 2-4-2 :** Fréquence horaire de trois paramètres (pluie, humidité relative et température) à l'échelle de la década dans les trois sites d'essai en 2000 et 2001. Les flèches en rouge représentent le moment où la maladie a été enregistrée.



**Figure 2-4- 3 : Analyse de la température et de l'interaction de la température et de l'humidité. A-1 : Etude de la corrélation entre la classe de température comprise entre 4 et 16°C et celle comprise entre 18 et 22°C. A-2 : Représentation en bulles des différentes classes de températures. B-1 : Corrélation entre la classe avec humidité inférieure à 60 % et humidité relative supérieure à 92 % pour la même classe de température. B-2 : Représentation en bulles des différentes classes d'humidité pour une température comprise entre 4 et 16°C.**

Donc, la limite minimale de la température ne pourrait pas être située entre 0 et 4°C mais plutôt à partir de 4°C (seuil minimal). La classe de température qui domine pendant l'épidémie de rouille est celle comprise entre 4 et 16°C. Il est important de signaler une corrélation importante et négative ( $-0,81$  ;  $P < 0,05$ ) entre la classe de la température comprise entre 4 et 16°C et celle avec la température comprise entre 18 et 22°C. Cette dernière classe est inhibitrice pour la maladie.

Il ressort de cette première partie que les conditions météorologiques favorables à la maladie sont : a) l'absence de la pluie ou avec une fréquence très faible (entre 0 et 1 mm/h) ; b) température comprise entre 4 et 16°C ; c) une humidité relative supérieure à 92%. Cependant, dans cette première partie, nous avons analysé individuellement chaque paramètre sans prendre en compte les interactions entre les différents paramètres. Il est possible que l'interaction entre certains paramètres affaiblisse leur fréquence horaire au sein de la décade.

### III.1.2. Evaluation des interactions entre les paramètres météorologiques (Partie II)

L'analyse de l'interaction de la classe dominante de la température (entre 4 et 16°C) avec les différentes classes d'humidité (figure 2-4-4) a révélé l'importance de la classe avec l'humidité relative supérieure à 92 % avant la latence de la rouille jaune et de la classe avec l'humidité relative inférieure à 60% lorsque la maladie a été absente. Une corrélation négative et significative ( $r = -0,6$  ;  $P < 0,05$ ) a été mise en évidence entre ces deux classes d'humidité ce qui confirme notre analyse (figure 2-4-3 B). En plus de cette analyse, nous avons calculé la fréquence d'occurrence au niveau de chaque décade de l'interaction entre la présence de la pluie et la classe de l'humidité dominante. Notre analyse a montré que les faibles pluies (entre 0 et 1 mm) s'associent majoritairement à un minimum de 4 heures consécutives d'humidité supérieure à 92 % avec une température comprise entre 4 et 16°C. La présence de la pluie avec des classes d'humidité inférieure à 92 % a été presque

---

nulle. La présence de la pluie avec les classes d'humidité dominantes au début de l'épidémie indique que cette pluie avec intensité faible a eu un rôle dans le dépôt de spores sur les feuilles plus que sur le processus d'infection. Ce dernier est plus conditionné par l'humidité et la température. Le rôle de la pluie dans le dépôt des spores de rouille a été prouvé par plusieurs chercheurs (MAY, 1958; ROWELL & ROMIG, 1966; NAGARAJAN *et al.*, 1977; SACHE, 2000). Sans la pluie, les spores peuvent rester très longtemps en suspension dans l'air de par leur très faible masse (SACHE, 2002). La présence de la pluie dans les décades qui ont suivi la première apparition de la maladie indique que le rôle de la pluie ne s'est pas seulement limité au dépôt de spores mais à la dispersion à petites échelles de l'inoculum et à la formation des foyers primaires de la maladie et à sa généralisation à l'ensemble des parcelles.

Il ressort de cette deuxième partie d'analyse que c'est l'humidité supérieure à 92 % en interaction avec une température comprise entre 4 et 16°C qui a favorisé l'épidémie de la rouille jaune au Grand-duché du Luxembourg. Par opposition, la classe de l'humidité inférieure à 60 % a plutôt un rôle défavorable à la progression de la maladie. La pluie avec une faible intensité a eu un double rôle: a) un rôle catalyseur de l'épidémie puisqu'elle a été indispensable au dépôt de spores ; b) un rôle de dispersion de la maladie à de petites échelles ce qui a donné naissance à des foyers primaires de la maladie.

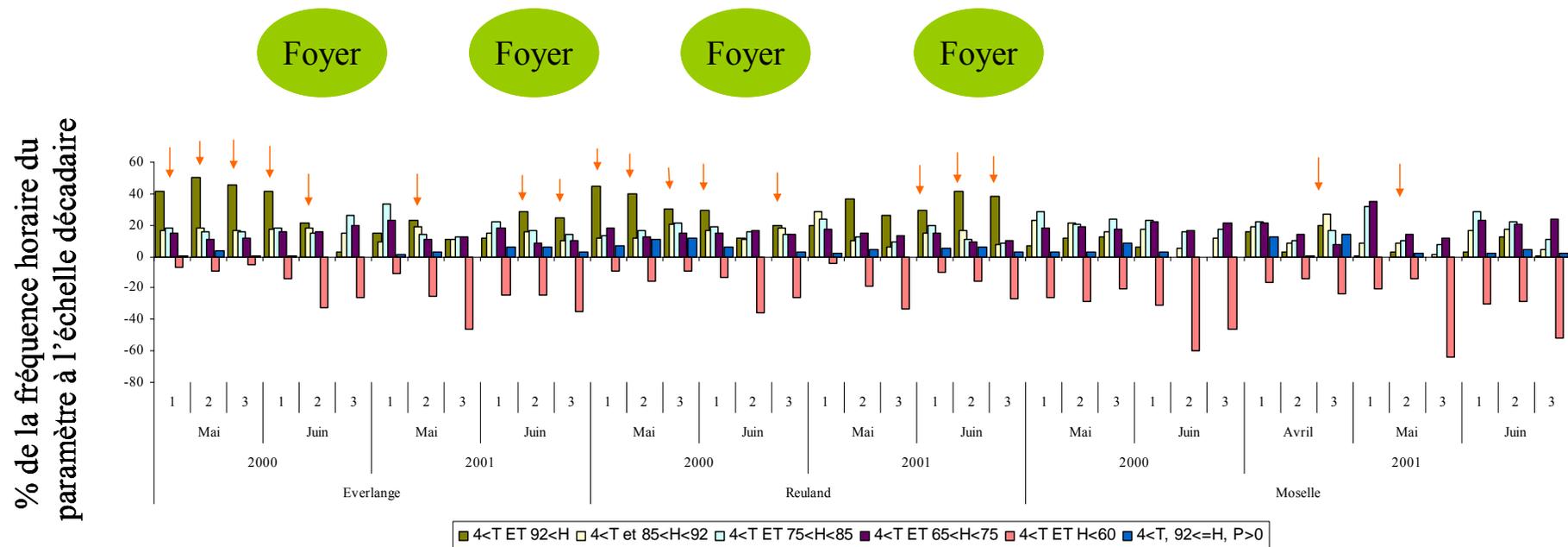


Figure 2-4- 4: Variation des différentes classes de l'humidité pour une température comprise entre 4 et 16°C pendant les décades de mai et juin en 2000 et 2001 (pendant cette année la maladie a été tardive jusqu'au 19 juillet et dans la Moselle, elle a été très précoce) dans les trois sites d'essais. Une classe avec la fréquence de la présence de la pluie ( $P > 0$ ) et l'humidité relative supérieure à 92 % et la température comprise entre 4 et 16°C a été testée. Les flèches orange représentent le moment où la maladie a été enregistrée. Les petits cercles indiquent le moment de formation des foyers.

### III.1.3. Evaluation de la superposition des interactions entre les classes de température et d'humidité pour les heures consécutives et la maladie (Partie III)

Dans la première partie nous avons évalué l'importance horaire de chaque paramètre individuellement (partie I) et en interaction (partie II) sans prendre en compte les heures consécutives de chaque classe testée à l'échelle de la décade et sans prendre en compte la maladie comme variable du modèle. La maladie a été prise en considération dans l'interprétation des résultats sans qu'elle fasse partie intégrante du modèle. Dans cette partie, nous avons pris en considération que les heures consécutives (au moins 4 heures consécutives et au moins 8 heures consécutives) et la maladie est une variable intégrante dans le modèle. Par cette analyse, notre but est de faire ressortir avant la latence un seuil (fréquence de l'occurrence de chaque classe du tableau 2-4-2 calculé par pas de temps horaire à l'échelle de la décade) minimal à prendre en considération pour expliquer la présence de la maladie et la période qui permettra de mieux simuler la maladie au Grand-Duché de Luxembourg.

Pour déterminer ce seuil, nous avons superposé la maladie (AUDPC de chaque feuille) à l'échelle de chaque décade (figure 2-4-5) et nous avons établi un code binaire pour chacune de ces décades (1 = présence et évolution de la maladie, 0 = absence ou aucune évolution de la maladie). Grâce à ce code, nous avons calculé les scores et les occurrences statistiques pour chaque seuil fixé. Ainsi, supposons que nous calculons les scores (S & O, NS & O, S & NO) de chaque classe du tableau 2-4-2 (minimum 4 heures consécutives et minimum 8 heures consécutives) pour le seuil fixé à 5 %, nous nous référons à la figure 2-4-5 B et C. Si le seuil fixé est inférieur ou égal à la fréquence enregistrée pour la classe testée dans la figure B, nous vérifions le code enregistré dans la figure C : a) s'il correspond à 1, ce chiffre devrait être ajouté au score S & O ; b) s'il correspond à 0, le chiffre 1 devrait être ajouté à la classe S & NO. Si au contraire, le seuil fixé est supérieur à la fréquence enregistrée pour la classe testée dans la figure B, nous vérifions le code enregistré dans la figure C, s'il correspond à 1, ce chiffre devrait être ajouté au score NS & O. En se basant sur ce principe, nous avons calculé les scores correspondant à chaque classe pour chaque seuil fixé. Une fois les scores calculés, nous avons calculé POD, FAR et CSI de chaque classe et pour chaque seuil fixé (tableau 2-4-4).

Le choix de seuil consiste à interagir les trois occurrences statistiques (POD, FAR et CSI). Le meilleur seuil serait celui avec le POD et CSI proche de 1 et FAR proche de 0. Il s'agit d'une procédure pas à pas qui permettra de refléter la classe dominante et la démarquer par rapport aux autres classes.

Ces résultats révèlent qu'avant la latence la seule classe qui explique la maladie est celle avec une température comprise entre 4 et 16°C et une humidité supérieure à 92 % pendant au moins 4 heures consécutives. Déjà pour un seuil de 5 % (fréquence de l'occurrence de chaque classe du tableau 2-4-2 calculée par pas de temps à l'échelle de la décade), les autres classes enregistrent un FAR très important et un CSI faible. Ces classes sont éliminées d'office par rapport à la classe dominante et ne permettraient pas d'expliquer l'évolution de la maladie. Seulement, 5 %, le FAR enregistré par la classe dominante est proche de 20 % pour un minimum de 4 heures consécutives et proche de 15 % pour un minimum de 8 heures consécutives. De plus, la classe avec une humidité inférieure à 60 % enregistre un POD proche de 1.

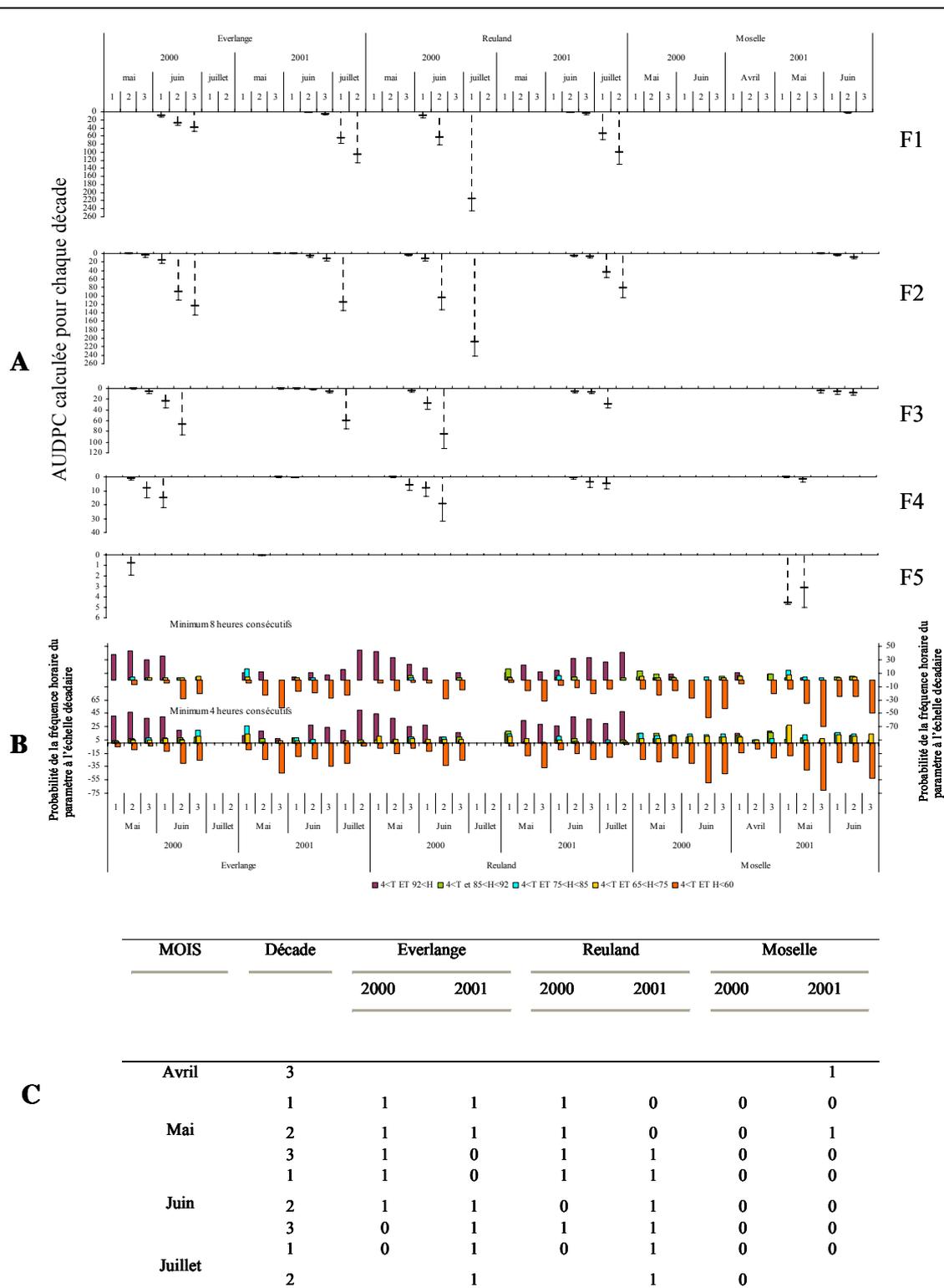


Figure 2-4- 5 : Superposition de la maladie et les paramètres météorologiques. A : AUDPC de la maladie à l'échelle de la décade pour chacune des cinq dernières feuilles (trait continu représente l'écart type). B : Variation de la fréquence horaire de chaque classe à l'échelle décadaire pour minimum 4 heures consécutives et pour minimum 8 heures consécutives. C : Code binaire de chaque décade exprimant le développement (1) ou l'absence de développement de la maladie (0).

**Tableau 2-4-4 : Résultats de scores et des occurrences statistiques des différents paramètres météorologiques de chaque seuil de fréquence fixé pour l'ensemble des classes pour minimum 4 heures consécutives et pour minimum 8 heures consécutives.**

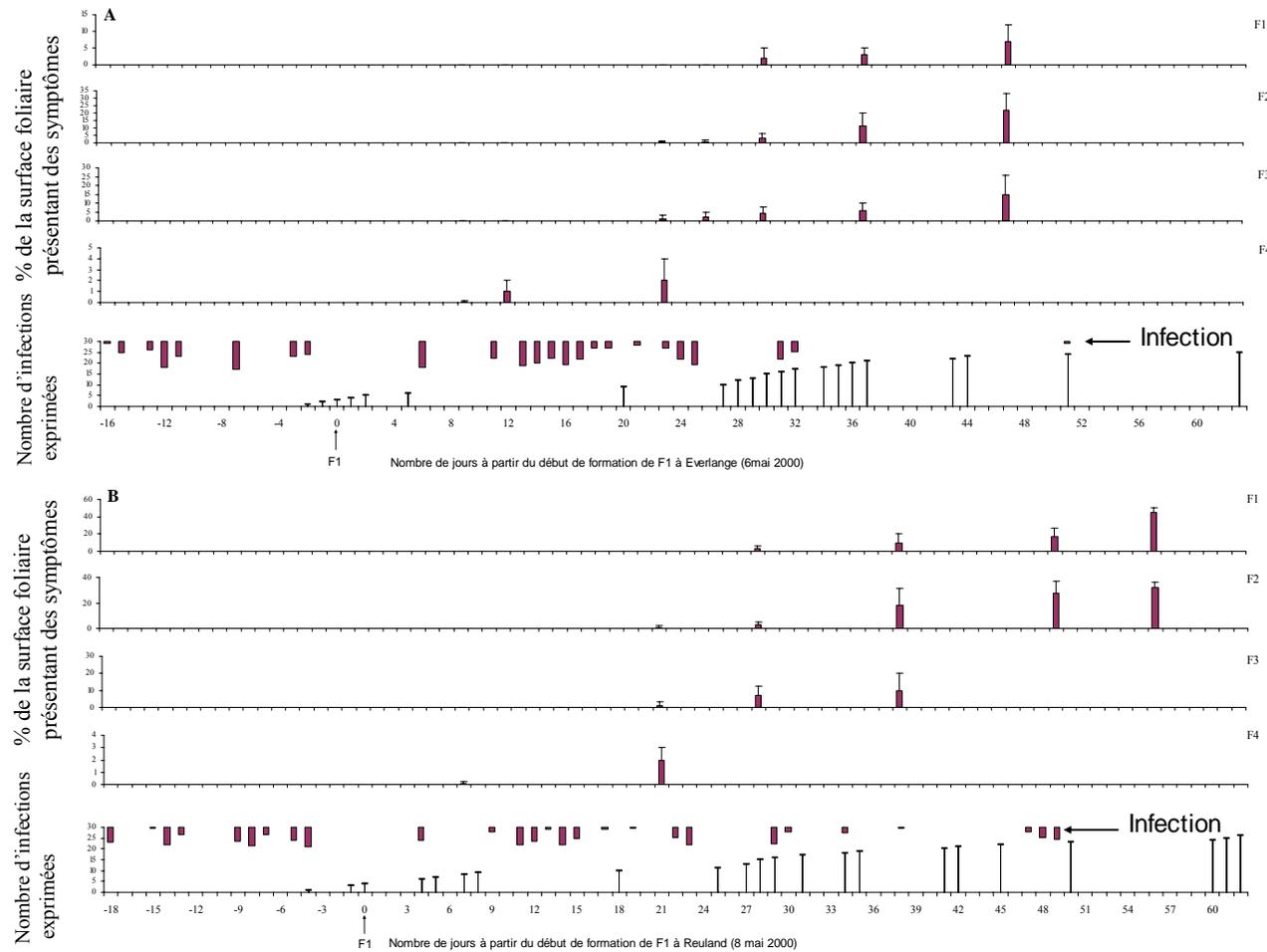
Seuil	Paramètre météorologique	Minimum 4 heures consécutives						Minimum 8 heures consécutives					
		S+O	NS+O	S+NO	POD	FAR	CSI	S+O	NS+O	S+NO	POD	FAR	CSI
5%	T>4 et H>92%	25	0	6	1	0.19	0.81	22	2	4	0.92	0.15	0.79
	T>4 et 85<H<92	9	13	10	0.4	0.53	0.28	2	22	6	0.08	0.75	0.06
	T>4 et 75<H<85	11	13	12	0.46	0.52	0.31	3	21	3	0.13	0.5	0.11
	T>4 et 65<H<75	9	13	14	0.4	0.61	0.25	0	24	3	0	1	0
	T>4 et H<60	20	2	17	0.91	0.46	0.51	15	10	16	0.6	0.52	0.36
10%	T>4 et H>92%	23	1	3	0.96	0.12	0.85	21	4	2	0.84	0.08	0.78
	T>4 et 85<H<92	1	23	6	0.04	0.86	0.03	0	22	2	0	1	0
	T>4 et 75<H<85	3	21	10	0.13	0.77	0.09	1	23	1	0.04	0.5	0.04
	T>4 et 65<H<75	2	23	8	0.08	0.8	0.06	0	24	1	0	1	0
	T>4 et H<60	17	7	17	0.7	0.5	0.4	12	11	16	0.52	0.57	0.3
15%	T>4 et H>92%	22	2	2	0.92	0.08	0.85	14	10	1	0.58	0.06	0.56
	T>4 et 85<H<92	1	22	4	0.04	0.8	0.04	0	23	1	0	1	0
	T>4 et 75<H<85	1	23	4	0.04	0.8	0.04	1	23	1	0.04	0.5	0.04
	T>4 et 65<H<75	0	24	1	0	1	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et H<60	14	11	16	0.56	0.53	0.34	10	14	13	0.42	0.57	0.27
20%	T>4 et H>92%	19	5	1	0.8	0.05	0.73	12	12	1	0.5	0.08	0.48
	T>4 et 85<H<92	0	23	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et 75<H<85	1	23	2	0.04	0.67	0.04	0	24	0	0	0	0
	T>4 et 65<H<75	0	24	1	0	1	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et H<60	11	12	15	0.48	0.58	0.29	8	16	12	0.3	0.58	0.2
25%	T>4 et H>92%	16	8	1	0.66	0.06	0.64	11	13	0	0.46	0	0.46
	T>4 et 85<H<92	0	24	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et 75<H<85	1	23	1	0.04	0.5	0.04	0	24	0	0	0	0
	T>4 et 65<H<75	0	24	1	0	1	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et H<60	8	16	12	0.3	0.6	0.2	4	20	9	0.16	0.69	0.12
30%	T>4 et H>92%	11	13	1	0.46	0.08	0.4	10	14	0	0.42	0	0.42
	T>4 et 85<H<92	0	24	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et 75<H<85	0	24	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et 65<H<75	0	24	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et H<60	4	20	7	0.17	0.63	0.13	2	22	5	0.08	0.71	0.07
35%	T>4 et H>92%	10	14	0	0.41	0	0.4	6	18	0	0.25	0	0.25
	T>4 et 85<H<92	0	24	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et 75<H<85	0	24	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et 65<H<75	0	24	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
	T>4 et H<60	2	23	5	0.08	0.71	0.06	1	23	5	0.04	0.83	0.03

Nous remarquons que pour la classe avec température supérieure à 4°C associée à une humidité supérieure à 92 %, le FAR diminue au fur et à mesure que le seuil augmente mais des diminutions sont enregistrées aussi pour le POD et CSI. A chaque augmentation du seuil, les conditions deviennent très exigeantes et donc tout ce qui est simulé sera observé. Mais lorsque la valeur du seuil est très importante (exemple 35 %) POD a tendance à s'éloigner de 1 et nous risquons de détecter certaines périodes sans qu'elles soient simulées par le modèle. Donc, le seuil qui devra être choisi devrait correspondre à un CSI proche de 1, un FAR proche de 0 et un POD proche de 1. Ainsi, le meilleur seuil correspond à 15 % (température comprise entre 4 et 16°C et humidité supérieure à 92 %) pour minimum 4 heures consécutives et à 10 % pour minimum 8 heures consécutives. Le choix de ces seuils se justifie par le FAR qui est proche de 0, un CSI qui reste proche de 1 (0.85 pour minimum 4 heures consécutives et 0.78 pour minimum 8 heures consécutives) et un POD proche de 1. Les seuils supérieurs à 15 % affaiblissent le CSI et POD et ceux inférieurs accroissent le FAR, ce qui engendrerait une faible qualité de simulation.

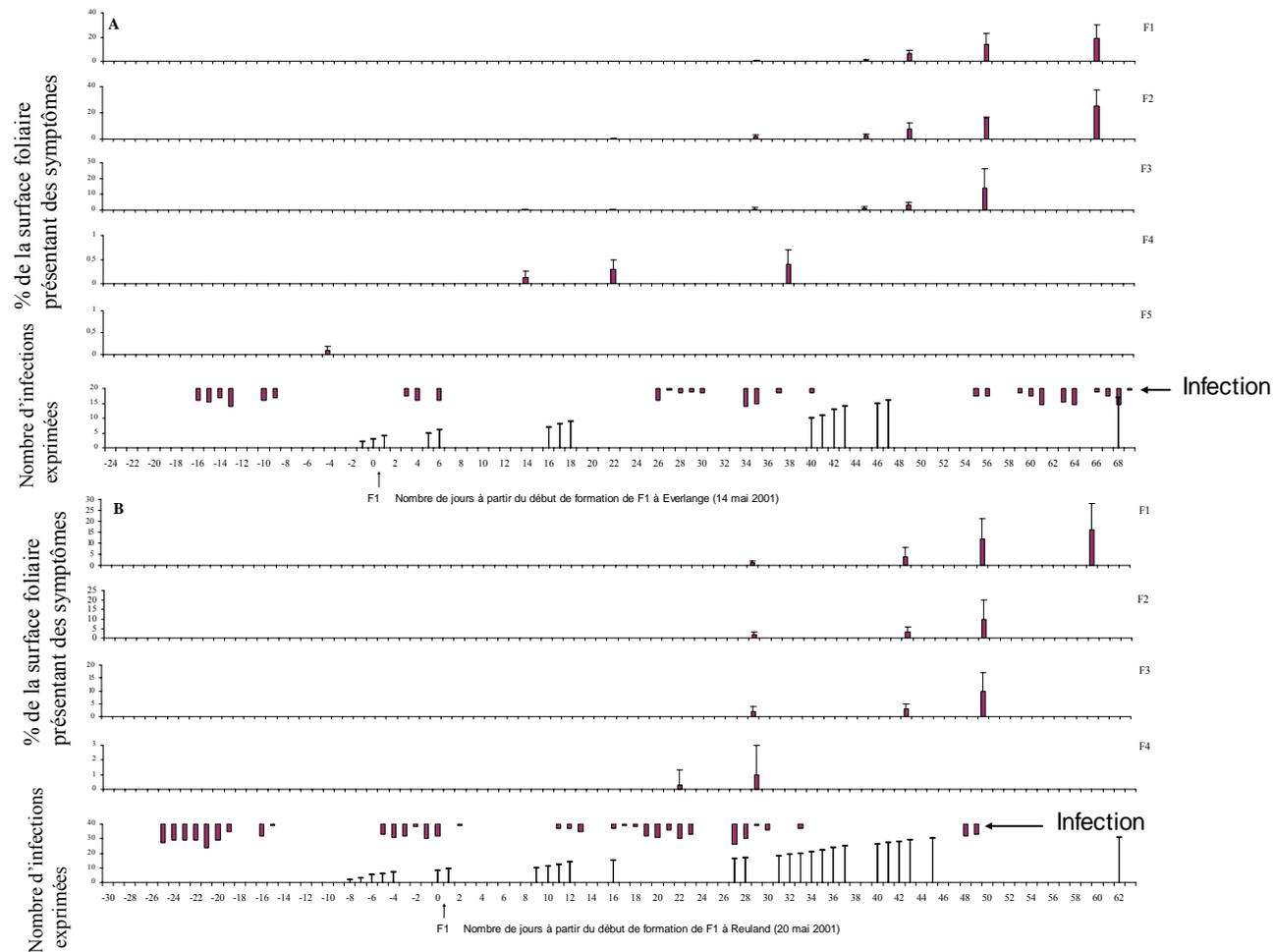
---

#### III.1.4. Proposition d'un modèle de simulation de la rouille jaune au Grand-duché du Luxembourg (Partie IV)

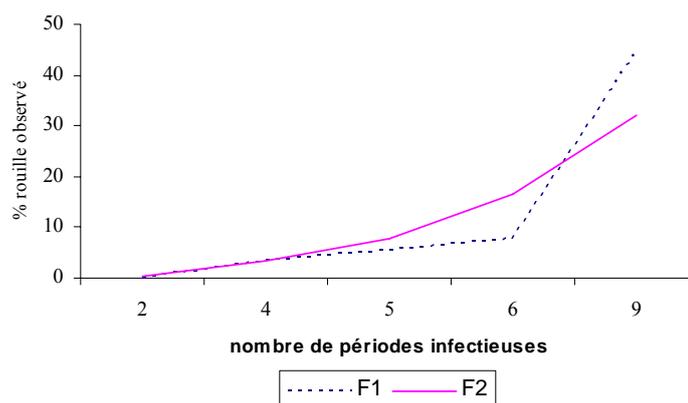
La partie III de notre analyse a répondu à la question du choix de l'algorithme de référence que nous avons posé lors de l'introduction de cet article avec en plus une référence sur la fréquence à prendre en considération. Cet algorithme correspond à une humidité supérieure à 92 % pendant au moins 4 heures consécutives et une température comprise entre 4 et 16°C avec une fréquence horaire à l'échelle de la décade supérieure à 20 % soit au mois 48 heures consécutives. La pluie de faible intensité est indispensable lorsque l'inoculum est présent pour déclencher l'épidémie. La durée de latence a été calculé pour chaque infection issue de ce modèle par la formule de ZADOKS (1961) aménagée par RAPILLY (1976). Nous avons superposé la maladie (en % de la surface foliaire) mesurée sur les feuilles par rapport aux nombres de latence issus de ce modèle en 2000 à Everlange (figure 2-4-6 A) et Reuland (figure 2-4-6 B) ainsi qu'en 2001 à Evelange (figure 2-4-7 A) et Reuland (figure 2-4-7 B). Les résultats de la simulation donnée par le modèle sont très satisfaisants pour les deux sites et pendant les deux années 2000 et 2001. La relation établie entre les périodes d'infection (entre le 1<sup>er</sup> mai et le 1<sup>er</sup> juillet) prenant en compte en même temps les deux années (2000 et 2001), les deux sites et le pourcentage de surface foliaire présentant des symptômes de rouille sur F1 et F2 (figure 2-4-8) révèle une bonne concordance entre la simulation et l'observation ( $r = 0.92$ ,  $P < 0.05$ ).



**Figure 2-4- 6:** Superposition de la latence calculée pour chaque infection simulée par le modèle et la maladie mesurée (en % foliaire) sur les feuilles. A : Everlange 2000 (station météorologique d'Everlange du Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück) ; B : Reuland 2000 (station météorologique d'Hersberg du CRP-GL). L'échelle des abscisses est exprimée par le nombre de jours par rapport à la formation de la dernière feuille (F1).



**Figure 2-4- 7 : Superposition de la latence de chaque infection simulée par le modèle et la maladie mesurée (en % foliaire) sur les feuilles. A : Everlange 2001 (station météorologique d'Useldange de l'Administration Des Services Techniques de l'Agriculture) ; B : Reuland 2001 (station météorologique d'Hersberg du CRP-GL). L'échelle des abscisses est exprimée par le nombre de jours par rapport à la formation de la dernière feuille (F1).**



**Figure 2-4- 8 : Relation entre le nombre d'infection entre le 01/05 et le 01/07 en 2000 et 2001 et le pourcentage de rouille jaune observé sur F1 et F2 à Everlange et Reuland.**

## IV. Discussion

Notre méthode se base en partie sur une approche stochastique pour déterminer les conditions favorables à la rouille jaune au Grand-Duché de Luxembourg. Cette approche est analysée dans les situations où l'inoculum primaire est disponible (cas de 2000 et 2001 à Everlange et Reuland et 2001 dans la Moselle) et dans le cas où l'inoculum n'est pas disponible (cas de la Moselle en 2000). Cette approche diffère de celle de la septoriose qui est plus mécaniste. Dans cette approche, la formation des feuilles n'est pas prise en compte du fait que la dispersion de la maladie est aléatoire et ne suit pas un gradient vertical comme la septoriose. Dans nos observations, nous avons souvent tendance à observer dans le cas de la rouille jaune et la rouille brune plus de maladie sur la F2 que sur la F1. La F1 est située au sommet de la plante et reçoit plus de rayons solaires et constitue un ombrage pour la F2. La rouille jaune est très sensible aux ultraviolets. Cependant, les spores de la rouille jaune sont dispersées par le vent et sont déposées sur les feuilles grâce à de fines pluies. Les spores de *S. tritici* sont projetées par les éclaboussures du bas vers le haut mais celles de la rouille sont déposées par le haut (SACHE, 2000). Nous sommes en face de deux phénomènes de dispersion tout à fait différents. Dans le cas de la septoriose, il est possible de connaître la feuille qui sera infectée sur base des informations concernant la feuille formée et la trajectoire des éclaboussures. Dans le cas de la rouille jaune, il est difficile d'estimer la feuille exacte qui sera infectée puisque les spores sont déposées. En revanche, il est possible d'estimer sur base du stade de la croissance de la plante, la position de l'inoculum par rapport à la couverture végétale.

Cette étude a permis de dégager les conditions météorologiques qui ont favorisé la rouille jaune au Grand-Duché du Luxembourg. Si les conditions favorisant la dispersion de cette maladie ont été largement évoquées dans la littérature (SACHE & DE VALAVIELLE-POPE, 1993 ; GEAGEA *et al.*, 1999 ; DE VALLAVIELLE-POPE *et al.*, 2000 ; GEAGEA *et al.*, 2000 ), la quantification des conditions météorologiques n'a en revanche jamais été évoquée. Dans les conditions contrôlées, les auteurs (SACHE & DE VALAVIELLE-POPE, 1993 ; DE VALLAVIELLE-POPE *et al.*, 1994 ; GEAGEA *et al.*, 1999 ; DE VALLAVIELLE-POPE *et al.*, 2000 ; GEAGEA *et al.*, 2000) ont étudié les conditions météorologiques qui ont favorisé la dispersion des spores et leurs dépôts sur le couvert végétal avec des intervalles qui diffèrent d'un auteur à l'autre. Mais dans la réalité du terrain, la maladie est confrontée à des contrastes météorologiques et topoclimatologiques importants qui font varier les niveaux de la maladie par rapport à

---

celles contrôlées. Ce qui démarque notre étude par rapport à celles déjà décrites dans la littérature est la quantification et la détermination de seuils limites des conditions météorologiques qui ont assuré une efficacité d'infection en fonction des différentes conditions météorologiques du Grand-Duché de Luxembourg.

De plus, dans la littérature aucun renseignement relatif aux périodes d'interruption des paramètres météorologiques et leur effet sur l'infection n'a été évoqué. Ce renseignement pourrait être déterminé dans les conditions contrôlées mais resterait difficile à interposer dans un champ réel (contrastes topoclimatologiques, susceptibilité variétal, présence de l'inoculum).

La présence de la maladie dans trois sites à caractéristiques climatiques différentes au Grand-Duché de Luxembourg en 2000 et 2001 et l'absence de la maladie en 2000 dans la Moselle ont permis de dégager les conditions à prendre en considération dans la simulation.

Ainsi, notre étude de fréquences d'occurrence horaire à l'échelle de la décade nous a permis de déterminer les classes de températures, d'humidité et de pluie qui ont favorisé l'épidémie de la rouille jaune. Il s'agit d'une humidité supérieure à 92 % associée à une température comprise entre 4 et 16°C. La pluie est indispensable au début de l'épidémie pour son déclenchement mais elle n'est pas nécessaire dans le processus d'infection. Le rôle de la pluie est aussi déterminant dans la formation des foyers à proximité (SACHE, 2000 ; SACHE, 2002). Nos résultats sur le rôle de la pluie sont en accord avec ceux de GEAGEA *et al.* (1999 et 2000).

Concernant, les périodes d'interruption des paramètres météorologiques, notre étude a révélé qu'au moment de l'épidémie, la fréquence des heures consécutives inférieure à 4 heures d'humidité supérieure à 92 % était très négligeable voire nulle. Cependant, lorsque l'inoculum est présent, un minimum de 4 heures consécutives d'humidité supérieure à 92 % et une température entre 4 et 16°C sont indispensables. En revanche, des évolutions très importantes de la maladie ont été enregistrées en présence de minimum 8 heures consécutives d'humidité supérieure à 92 % avec une température comprise entre 4 et 16°C. L'analyse des seuils de fréquence d'occurrence des différentes classes calculées par pas de temps horaire à l'échelle de la décade a révélé l'importance de prendre le seuil de 15 % (tableau 2-4-4) de la classe dominante avec minimum 4 heures consécutives (humidité supérieure à 92 % et la température comprise entre 4 et 16°C). Ce seuil de 15 % se réduit à 10 % pour un minimum de 8 heures consécutives de la classe dominante. Les occurrences statistiques calculées pour ces seuils ont fait émerger un CSI de 0.85 pour minimum 4 heures consécutives et de 0.78 pour minimum 8 heures consécutives.

En plus de ce CSI très important, les fausses alertes ont été presque nulles pour ces seuils. En se basant sur les seuils minimaux des heures consécutives, nous avons pu déterminer les classes dominantes qui ont favorisé l'épidémie de la rouille au Grand-duché du Luxembourg mais aussi celles qui la défavorisent. Il s'agit de la classe de l'humidité inférieure à 60 %. Cette analyse permet de proposer un modèle de simulation pour la rouille jaune au Grand-Duché de Luxembourg. Nos résultats ont révélé qu'il est indispensable de prendre une humidité supérieure à 92 % pendant au moins 4 heures et une température comprise entre 4 et 16°C pendant au moins 48 heures. Cependant, ces conditions sont associées à la présence de l'inoculum et à la susceptibilité de la variété. Lorsque ces conditions liées à la variété et au parasite sont réunies, une pluie fine au début est indispensable pour le dépôt des spores sur les feuilles. Les simulations de

l'infection et de la latence données par notre modèle sont en très bonne concordance ( $r = 0.92$ ,  $P < 0.05$ ) avec les données d'observation.

Ce module lié à la rouille jaune sera développé au sein de l'interface Proculture déjà mis en place pour les avertissements septoriose au Grand-Duché de Luxembourg dans le cadre du projet Sintama coordonné par le Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann. Dans cette étude, nous n'avons pas pris en considération le rayonnement qui pourrait être très important parce qu'il n'est pas mesuré par toutes les stations météorologiques implantées au Grand-Duché de Luxembourg. Cependant, nous avons jugé qu'en analysant la température, nous déduisons indirectement l'effet du rayonnement.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

2-4-1 : Tableau 2-4-1 : Les limites d'humidité relative et de la pluie fixées pour chaque algorithme sur base de la littérature (SACHE, 1994 ; DE VALLAVIEILLE-POPE et al., 2000 ; SACHE, 2000). et des résultats du chapitre 2 III.	IV-3
2-4-2 : Les paramètres analysés à différents intervalles en 2000 et 2001 à Everlange (Données météorologiques horaires d'Everlange en 2000 et d'Useldange en 2001), Reuland (Données météorologiques d'Hersberg) et la Moselle (Données météorologiques de Findel).	IV-3
2-4-3 : Méthodes de calculs de scores et des occurrences statistiques. Légende: O = observée; S = simulée; NO = non observée; NS = non simulée.	IV-6
2-4-4 : Résultats de scores et des occurrences statistiques des différents paramètres météorologiques de chaque seuil de fréquence fixé pour l'ensemble des classes pour minimum 4 heures consécutives et pour minimum 8 heures consécutives.	IV-13

## FIGURES

2-4- 1 : Les limites du modèle de latence (RAPILLY, 1976) concernant les températures rencontrées au Grand-Duché de Luxembourg (-10 à 33°C).	IV-5
2-4-2 : Fréquence horaire de trois paramètres (pluie, humidité relative et température) à l'échelle de la décade dans les trois sites d'essai en 2000 et 2001. Les flèches en rouge représentent le moment où la maladie a été enregistrée.	IV-7
2-4- 3 : Analyse de la température et de l'interaction de la température et de l'humidité. A-1 : Etude de la corrélation entre la classe de température comprise entre 4 et 16°C et celle comprise entre 18 et 22°C. A-2 : Représentation en bulles des différentes classes de températures. B-1 : Corrélation entre la classe avec humidité inférieure à 60 % et humidité relative supérieure à 92 % pour la même classe de température. B-2 : Représentation en bulles des différentes classes d'humidité pour une température comprise entre 4 et 16°C.	IV-8
2-4- 4 : Variation des différentes classes de l'humidité pour une température comprise entre 4 et 16°C pendant les décades de mai et juin en 2000 et 2001 (pendant cette année la maladie a été tardive jusqu'au 19 juillet et dans la Moselle, elle a été très précoce) dans les trois sites d'essais. Une classe avec la fréquence de la présence de la pluie ( $P > 0$ ) et l'humidité relative supérieure à 92 % et la température comprise entre 4 et 16°C a été testée. Les flèches orange représentent le moment où la maladie a été enregistrée. Les petits cercles indiquent le moment de formation des foyers.	IV-10
2-4- 5 : Superposition de la maladie et les paramètres météorologiques. A : AUDPC de la maladie à l'échelle de la décade pour chacune des cinq dernières feuilles (trait continu représente l'écart type). B : Variation de la fréquence horaire de chaque classe à l'échelle décadaire pour minimum 4 heures consécutives et pour minimum 8 heures consécutives. C : Code binaire de chaque décade exprimant le développement (1) ou l'absence de développement de la maladie (0).	IV-12
2-4- 6 : Superposition de la latence calculée pour chaque infection simulée par le modèle et la maladie mesurée (en % foliaire) sur les feuilles. A : Everlange 2000 (station météorologique d'Everlange du Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück) ; B : Reuland 2000 (station météorologique d'Hersberg du CRP-GL). L'échelle des abscisses est exprimée par le nombre de jours par rapport à la formation de la dernière feuille (F1).	IV-15
2-4- 7 : Superposition de la latence de chaque infection simulée par le modèle et la maladie mesurée (en % foliaire) sur les feuilles. A : Everlange 2001 (station météorologique d'Useldange de l'Administration Des Services Techniques de l'Agriculture) ; B : Reuland 2001 (station météorologique d'Hersberg du CRP-GL). L'échelle des abscisses est exprimée par le nombre de jours par rapport à la formation de la dernière feuille (F1).	IV-16
2-4- 8 : Relation entre le nombre d'infection entre le 01/05 et le 01/07 en 2000 et 2001 et le pourcentage de rouille jaune observé sur F1 et F2 à Everlange et Reuland.	IV-17

## REFERENCES

- CHESTER, K. S. (1946). The nature and prevention of the cereal rusts as amplified in the leaf rust of wheat. *Annales Cryptogamici et Phytopathologici. The Chronica Botanica Company*. Waltham (EU). 4.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., L. HUBER, M. LECONTE & H. GOYAU (1994). "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." *The American Phytopathological Society* **85**: (4) 409-415.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., J. ROUZET, M. LECONTE, M. DELORS & M. N. MISTON (2000). "La rouille jaune du blé en France. Des épidémies déclenchées par une nouvelle race, un hiver doux et un printemps humide." *Phytoma. La défense des végétaux* **527**: 22-29.
- DENNIS, J. I. (1988). "Temperature and wet-period conditions for infection by *Puccinia striiformis* F.sp. *tritici* race 104E137A+." *Trans.Br.Mycol.Soc.* **1**: 91-96.
- EL JARROUDI, M., B. TYCHON, H. MARAITE, L. HOFFMANN & S. TOURE (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 Luxembourg. VIII ESA Congress : European Agriculture in a global context. KVL. Copenhagen. Denmark. 11-15 July 2004. S.-E. J. JACOBSEN, C.R.; PORTER, J.R. ISBN 87-7611-062-1. pp.83-84.
- GEAGEA, L., L. HUBER & I. SACHE (1999). "Dry-dispersal and rain-splash of brown (*P. recondita* f. sp. *tritici*) and yellow (*P. striiformis*) rust spores from infected wheat leaves exposed to simulated raindrops." *Plant Pathology* **48**: 472-482.
- GEAGEA, L., L. HUBER, I. SACHE, D. FLURA, H. A. MAC CARTNEY & B. D. L. FITT (2000). "Influence of simulated rain on dispersal of rust spores from infected wheat seedlings." *Agricultural and Forest Meteorology* **101**: 53-66.

- GREGORY, P. H. (1968). "Interpreting Plant Disease Dispersal gradients." Ann. Rev. Phytopathol. **6**: 181-212.
- MAC CARTNEY, H. A. & B. D. L. FITT (1998). Dispersal of foliage fungal plant pathogens : mechanisms, gradients and spatial patterns. The epidemiology of plant diseases. K. A. Publisher. Dordrecht. pp. 138-160.
- MAY, F. G. (1958). "The whashout of *Lycopodium* spores by rain." Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society **84**: 451-458.
- NAGARAJAN, S., H. SINGH, L. M. JOSHI & E. E. SAARI (1977). "Prediction of *Puccinia graminis* f.sp. *tritici* on wheat in India by trapping the uredospores in rain samples." Phytoparasitica **5**: 104-108.
- RAPILLY, F. (1977). "Réflexions sur les notions de propagules et d'unité de dissémination en épidémiologie végétale." Ann. Phytopathol. **9**: 161-176.
- RAPILLY, F. (1991). Epidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. Epidémiologie en pathologie végétale. L. T. Doc. Paris. Institut National de la Recherche Agronomique INRA. ISBN 2-7380-0297-8. 317 p. pp. 240-261.
- RAPILLY, F. & E. JOLIVET (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.
- ROUZET, J. (1995). "Etude d'un modèle de prévision Prgi concernant la rouille jaune du blé." Med.Fac.Landbouw Univ.Gent **60/26**: 447-451.
- ROWELL, J. B. & R. W. ROMIG (1966). "Detection of urediospores of wheat rusts in spring rains." Phytopathology **56**: 807-811.
- SACHE, I. (1994). "La dissémination éolienne des maladies cryptogamiques." Phytoma. La défense des végétaux **467**: 20-25.
- SACHE, I. (2000). "Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain." Agronomie **20**: 757-767.
- SACHE, I. (2002). L'épidémiologie végétale : un avenir incertain pour une discipline ancienne ? Diplôme d'habilitation à diriger les recherches. Université Paris-Sud, 44 p.
- SACHE, I. & C. DE VALAVIELLE-POPE (1993). "Comparison of the wheat brown and yellow rusts for monocyclic sporulation and infection processes, and their polycyclic consequences." Journal of Phytopathology **138**: 55-65.
- SHRUM, R. D. (1975). Simulation of wheat stripe rust *Puccinia striiformis* West. using Epidemic, a flexible plant disease simulator. Pa. State Univ.Agric.Exp.stn.Prog.Rep. 341 p.
- ZADOKS, J. C. (1961). "Yellow rust on wheat : studies in epidemiology and physiologic specialisation." Tijdschr.Planteziekten **67**: 69-256.

## CHAPITRE V

### ANALYSE CONCEPTUELLE DES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES INFLUENÇANT LA ROUILLE BRUNE AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG.

La compréhension des conditions météorologiques qui favorisent le développement de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg est indispensable pour permettre de préciser suffisamment à l'avance la tendance régionale de cette maladie. Une analyse des données météorologiques nocturnes et des données de la maladie de trois sites (Everlange, Reuland et la Moselle) entre 2000 et 2003 a révélé : a) une forte corrélation positive entre le nombre d'heures consécutives (au moins 12 heures) avec une température comprise entre 8 et 16°C, humidité supérieure à 60 % et la maladie enregistrée sur la F1 ( $r = 0.93$  ;  $P < 0.05$ ) et sur la F2 ( $r = 0.87$  ;  $P < 0.05$ ) ; b) la corrélation enregistrée avec une humidité supérieure à 70 % ( $r = 0.93$  ;  $P < 0.001$  pour F1 et  $r = 0.88$  ;  $P < 0.05$  pour F2) et celle supérieure à 80 % ( $r = 0.89$  ;  $P < 0.05$  pour F1 et  $r = 0.86$  ;  $P < 0.05$  pour la F2) ne diffère pas significativement de celle avec une humidité supérieure à 60 %.

Pour déterminer les conditions optimales qui sont à l'origine de l'évolution de l'épidémie pendant quatre années dans les trois sites d'essai, nous avons calculé les fréquences de la présence horaire à l'échelle de la décade des différentes classes de températures (8 à 10°C ; 10 à 12°C ; 12 à 14°C ; 14 à 16°C ; 16 à 18°C ; 18 à 20 ; 20 à 22 , ...) et des différentes classes d'humidité (60 à 65 ; 65 à 70 ; 70 à 75 ; 75 à 80 ; 80 à 85 ; 85 à 90 ; 90 à 95 ; 95 à 100). Ainsi, les températures optimales qui ont favorisé l'évolution de la maladie sont comprises entre 12 et 16°C (47 %). Les températures supérieures à 18°C ont été très négligeables. La maladie est très importante lorsque ces températures optimales sont associées à des humidités optimales supérieures à 80 % (64 %).

## I. Introduction

La rouille brune du blé, dont l'agent est *Puccinia recondita f.sp. tritici* est une maladie qui commence à prendre une importance capitale au Grand-Duché de Luxembourg ces dernières années. Elle a eu un développement spectaculaire particulièrement dans la région de Redange (1999, 2000 et 2001) et de la Moselle (2000, 2001 et 2003). Les apparitions fréquentes de cette maladie à des stades sensibles de la croissance du blé (entre stade GS55 et GS77), son fort potentiel épidémique et sa faculté de dispersion à grande échelle montre qu'une étude conceptuelle approfondie sur les mécanismes de son développement est une nécessité.

La rouille brune est causée par un champignon biotrophe strict, incapable de se développer autrement qu'en interaction étroite avec des tissus hôtes verts, sur la base de relations hôte-parasite hautement spécifiques. Les facteurs abiotiques qui favorisent la capacité et l'efficacité d'infection sont la température, la durée d'humectation et le taux d'humidité relative (MAC GREGOR & MANNERS, 1976 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 1995 ; SACHE, 1997 ; HAU & DE VALAVIELLE-POPE, 1998 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 2000a). La présence d'eau libre sur la surface de la feuille en forme de gouttelettes de rosée est essentielle pour la germination de spores de rouille brune (HAU *et al.*, 1998 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 2000). Dans un environnement contrôlé, une période

minimale de rosée continue de 4-6 h est nécessaire pour la pénétration de *P. recondita f.sp. tritici*. Cette période augmente à un minimum de 16 h aux températures sous-optimales. Une interruption de la période humide par une période sèche n'affecte pas les spores non germées qui sont capables d'infecter pendant la période humide suivante. Les spores qui ont amorcé le processus de germination initié du parasite sont incapables de survivre si une période sèche survient entre la germination des urédiniospores et la pénétration (DE VALLAVIELLE-POPE *et al.*, 2000). CHANG *et al.*, (1973) ont reporté que la lumière inhibe la germination des urédiniospores et que le degré d'inhibition est proportionnel à l'intensité lumineuse. Cependant, dans les conditions des champs, l'effet de la lumière sur la germination des urédiniospores est négligeable (EVERSMeyer, 1988). Ce sont la température et l'humidité relative qui sont les facteurs limitants dans les conditions réelles (EVERSMeyer, 1988). CLIFFORD & HARRIS (1981) montrent que la température optimale de germination est de 15°C et que le processus germinatif est stoppé au-delà de 35°C. En plus de ces facteurs abiotiques, les facteurs biotiques tels que les variétés plus susceptibles et les pathogènes plus virulents en interaction avec les facteurs abiotiques influencent le développement de la sévérité de la rouille brune (PARLEVLIET, 1979 ; SACHE, 1997 ; DE VALLAVIELLE-POPE *et al.*, 2000b).

Trois hypothèses sont indispensables pour comprendre les facteurs météorologiques qui sont à l'origine de l'évolution de l'épidémie de la rouille brune dans nos essais entre 2000 et 2003 : a) la présence de l'inoculum ; b) la présence d'une variété susceptible ; c) la présence des conditions météorologiques favorables à la maladie.

Pour vérifier ces hypothèses, nous avons réalisé des essais avec des mélanges de variétés pendant quatre années (entre 2000 et 2003).

L'objectif de ce chapitre est de comprendre les paramètres météorologiques qui ont favorisé le potentiel épidémique de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg entre 2000 et 2003.

## II. Matériels et méthodes

Un suivi au champ a été effectué à partir de la fin du tallage (début avril de chaque année) jusqu'à la maturité finale à une fréquence d'une fois par semaine dans la Moselle et Reuland (2000, 2001 et 2003) et Everlange en 2003 et deux fois par semaine à Everlange entre 2000 et 2002. La détermination de la surface foliaire malade a été basée sur les échelles de sévérité de JAMES (1976) et le logiciel Distrain (TOMERLIN & HOWELL, 1988). A chaque observation, nous avons enregistré le stade phénologique de la plante selon le code binaire de ZADOKS *et al.* (1974), l'état d'avancement de la maladie sur chaque étage foliaire ainsi que les surfaces en mètres carrés occupés par la maladie (cf. chapitre II, Partie I).

Ces essais ont permis de déterminer les stades de croissance aux quels la maladie est apparue ainsi que les variétés sensibles.

En ce qui concerne les conditions météorologiques, nous avons réalisé notre étude sur des données horaires fournies par : a) le Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück en 2000 et l'ASTA de 2001 à 2003 pour Everlange; b) le CRP-GL pour Hersberg proche de Reuland entre 2000 et 2001 et celles de Christnach en 2003 et c) le CRP-GL pour Findel entre 2000 et 2001, Burmerange en 2003 et l'ASTA pour celles de Remich.

Notre étude a été réalisée sur les périodes nocturnes pour faire ressortir les données météorologiques qui ont favorisé la germination et la pénétration dans l'hôte de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg. En effet, la germination de la rouille

brune a lieu essentiellement la nuit. La pénétration dans l'hôte, nocturne également, est négligeable en dessous de 10°C et au-dessus de 20°C (CLIFFORD & HARIS, 1981 ; EVERSMEYER *et al.*, 1988). Le taux de développement des structures d'infection est plus lent dans la lumière que dans l'obscurité. Les nuits claires, caractérisées par une source d'humidité importante avec des températures favorables pour la rosée sont plus importantes épidémiologiquement que des nuits nuageuses (EVERSMEYER, 1988). Ainsi, dans cet article, notre analyse consiste à déterminer les paramètres météorologiques nocturnes propices à la germination de la rouille brune pendant la décade qui précède chaque fin de latence dans les trois sites d'essai entre 2000 et 2003. La période de latence est de l'ordre de 8 à 20 jours entre 10 et 20°C, mais peut se réduire à 6 jours avec des températures de 20°C le jour et 10°C la nuit pour les variétés susceptibles (EVERSMEYER, 1988).

Notre méthodologie d'analyse pour l'ensemble des stations météorologiques horaires a été scindée en trois parties. La première consiste à déterminer le nombre d'heures nocturnes (entre 20 h et 6 h du matin) à l'échelle de chaque décade pour différentes classes d'humidité, de température et de précipitations (tableau 2-5-1) pendant trois périodes (hiver, entre le 21 mars et le 10 mai et entre le 10 mai et le 10 juillet).

**Tableau 2-5- 1 : Les différentes classes de température et d'humidité analysées entre 2000 et 2003 dans les différentes stations météorologiques étudiées.**

Humidité (H)	Température (T)	Pluie (P) en mm
H>60%	T<0°C	P=0
H>70%	0°C<T<4°C	P>0
H>80%	4°C<T<8°C	
	8°C<T<16°C	
	16°C<T	

La deuxième partie consiste à combiner chaque classe de température citée ci-dessus avec chaque classe d'humidité en présence et en absence de la pluie. Pour chaque classe associée, nous avons calculé le nombre d'heures à l'échelle de la décade où les conditions de la classe sont respectées ainsi que la fréquence de la présence horaire (toutes les heures de présence sont prises en compte sans aucune limite).

Dans la troisième partie, nous avons calculé, entre la montaison (trois décade d'avril) et fin de la maturité (10 juillet), la présence pendant des heures nocturnes consécutives (au moins 12 heures consécutives et au moins 24 heures consécutives) de chacune des classes combinées citées ci-dessus. En effet, DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.* (1995) a montré que la germination nécessite des heures continue de rosée à des températures comprises entre 5 et 16°C. Ensuite, nous avons calculé la corrélation (au seuil de fréquence de 5 %) de ces classes combinées pendant des heures nocturnes consécutives avec le taux de maladie enregistré sur F1 et F2 dans les trois sites (Everlange, Moselle et Reuland) entre 2000 et 2003. Enfin, en nous basant sur le nombre d'heures de la classe dominante (au moins 12 heures consécutives) pendant la décade qui précède chaque évolution de la maladie (entre début mai et 10 juillet), nous avons déterminé les valeurs seuils minimales et optimales de température et d'humidité qui ont favorisé la germination de la rouille brune. Un test de comparaison statistique ( $\alpha = 5 \%$ ) a été appliqué entre les différentes valeurs observées (2 fois par semaine) pour déterminer les nouvelles périodes de latences. Pour déterminer les conditions favorables à la germination, l'analyse est faite sur la décade qui précède chaque fin de latence.

### III. Résultats

#### III.1. Evaluation des paramètres météorologiques nocturnes (partie I)

Dans les quatre sites d'essais, la fréquence des heures sans pluie est beaucoup plus importante que la fréquence avec pluie (figure 2-5-1). Les quatre hivers (entre 2000 et 2003) ont été humides et relativement doux avec des classes de températures dominantes comprises entre 0 et 4°C (25 %) et entre 4 et 8°C (23 %). Entre la phase du tallage (fin mars) et la montaison (10 mai), ce sont deux classes de températures qui dominaient (4 à 8°C et 8 à 16°C), associées à des humidités supérieures à 60 %. Les périodes avec des humidités inférieures à 60% ne dépassaient pas 4 %. Les périodes avec pluie ne dépassaient pas 5%. Cependant, entre l'émergence des trois dernières feuilles et la maturité finale, c'est une seule classe de température qui l'emporte ; celle comprise entre 8 et 16°C sans pluie et une humidité supérieure à 60 %. Cette dernière comprend dans les faits une majorité de situations où l'humidité est supérieure à 80 %. Ainsi, les paramètres météorologiques qui auraient très probablement facilité la germination et la pénétration dans l'hôte de la rouille brune sont les températures nocturnes comprises entre 8 et 16°C, sans pluie et une humidité relative supérieure à 60 %.

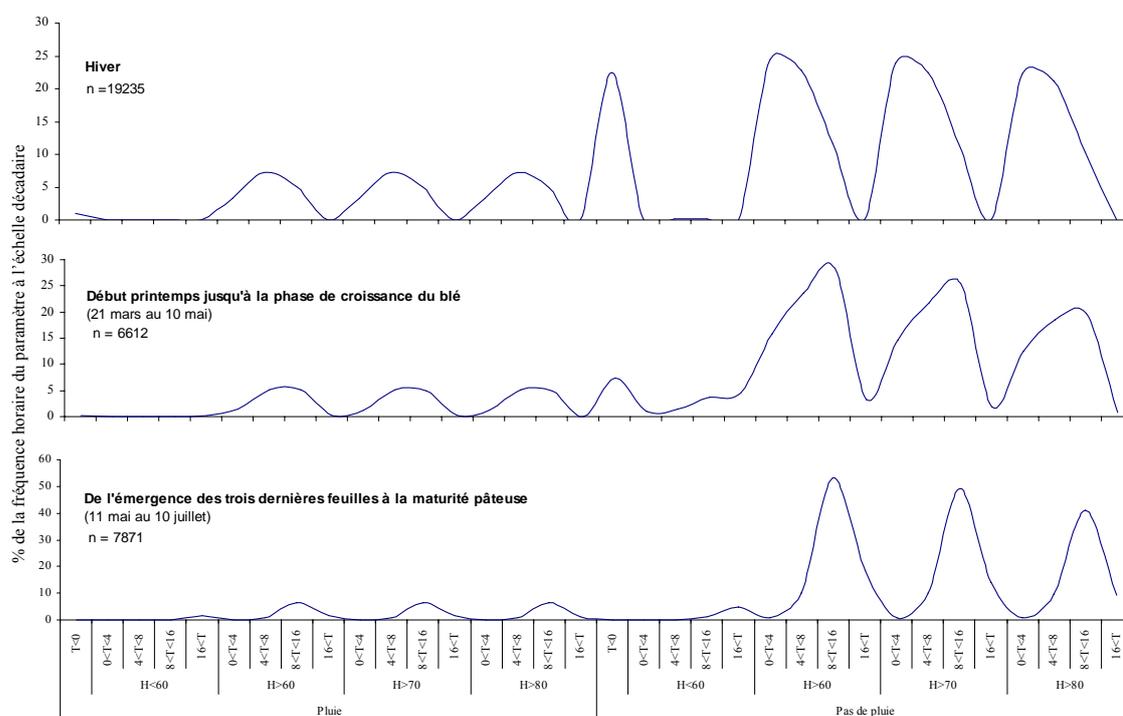


Figure 2-5- 1: Fréquence horaire de trois paramètres (pluie, humidité relative et température) à l'échelle de la décade dans les trois sites d'essai entre 2000 et 2003. (n) représente le nombre d'heures total qui a servi au calcul de la fréquence.

#### III.2. Evaluation des paramètres météorologiques nocturnes combinés à l'échelle décadaire pendant la croissance du blé (partie II)

L'analyse de la fréquence horaire décadaire entre le début du tallage et la fin de la maturité (début juillet) dans chaque site (figure 2-5-2) montre que les périodes nocturnes douces (températures comprises entre 8 et 16°C) et humides sans pluie ont commencé en 2000 dès la deuxième décade d'avril à Everlange pour atteindre un taux

très important vers le début mai. Les conditions de 2000 ont été très propices à la maladie et à un stade très précoce de la croissance du blé alors que pendant les autres années, les seuils maximaux ont été atteints vers fin juin. Les fréquences des classes avec des températures inférieures à 4°C et supérieures à 16°C ont été très minimales. Les périodes pluvieuses ont été insignifiantes par rapport aux non pluvieuses. Donc, cette analyse confirme la dominance pendant la croissance du blé de températures comprises entre 8 et 16°C associées à une humidité supérieure à 60 % et sans pluie.

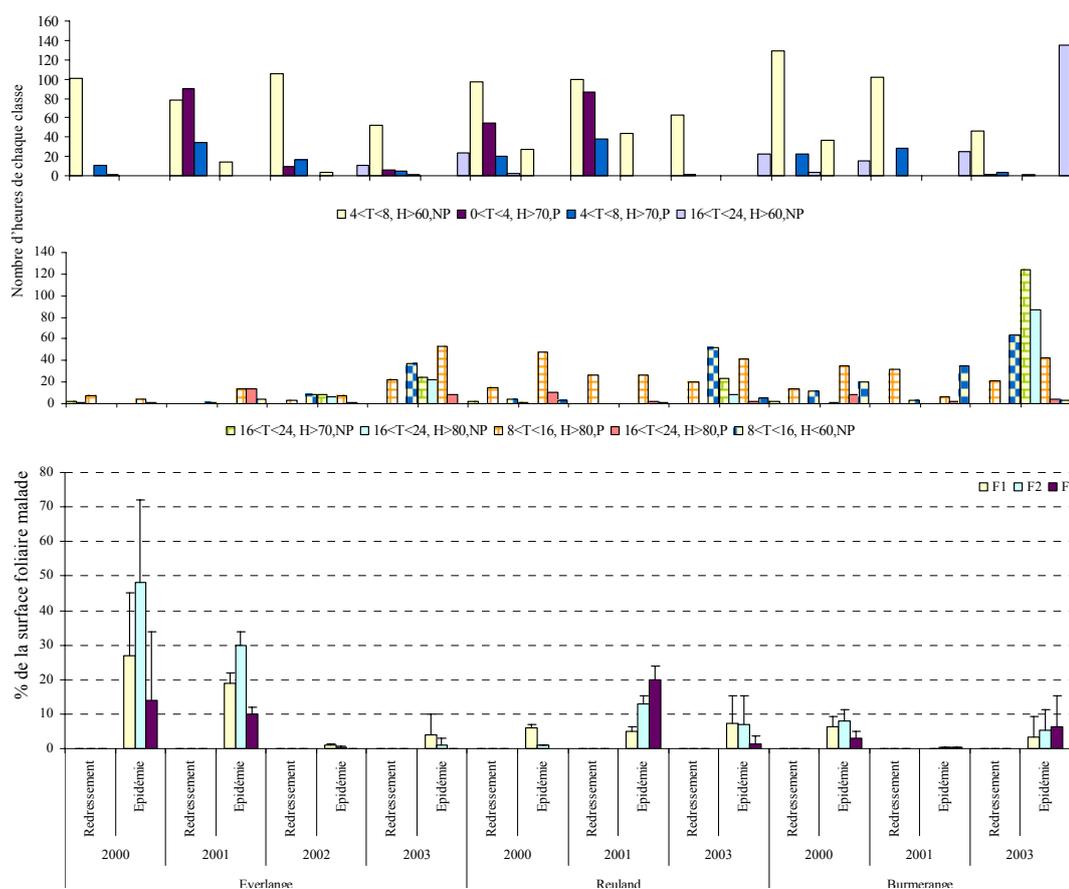
Cependant, à ce stade notre étude a été basée uniquement sur la fréquence de présence horaire à l'échelle décadaire sans aucune restriction.

Dans la troisième partie, nous allons prendre en considération uniquement les classes qui sont présentes dans deux cas : a) au moins 12 heures nocturnes consécutives ; b) au moins 24 heures nocturnes consécutives.



### III.3. Evaluation des paramètres météorologiques nocturnes combinés à l'échelle décadaire pour les heures consécutives et la maladie (partie III)

L'analyse du nombre d'heures nocturnes avec au moins 12 heures consécutives a montré que les classes des températures inférieures à 8°C associées à des humidités supérieures à 60 % se retrouvent pendant la phase de redressement (décades d'avril). Cependant, au moment de l'épidémie de la rouille brune (entre l'apparition de la première pustule au début mai jusqu'au 10 juillet de 2000 à 2003) (figure 2-5-3), la fréquence de ces classes est très faible. L'étude de la corrélation (tableau 2-5-2) entre les différentes classes de températures inférieures à 8°C et supérieures à 16°C associées aux différentes classes d'humidité avec ou sans pluie et le taux de maladie enregistré sur les trois dernières feuilles ne révèle aucun ajustement significatif.



**Figure 2-5- 3 : Variation en nombre d'heures des différentes classes combinées de température, humidité et la pluie pendant la phase de redressement et au moment de l'épidémie (10 mai à 10 juillet) entre 2000 et 2003. Les différentes classes sont superposées à la maladie observée (entre l'apparition des premiers pustules et début juillet) sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1)**

Cette étude de corrélation a fait ressortir la classe de températures comprise entre 8 et 16°C associée à une humidité supérieure à 60 % et sans pluie (figure 2-5-4). Cette corrélation est positive et significative entre cette classe et le niveau de maladie enregistré sur la F1 ( $r = 0.93$  ;  $r^2 = 0.87$  ;  $P < 0.05$ ) et la F2 ( $r = 0.87$  ;  $r^2 = 0.76$  ;  $P < 0.05$ ). Cependant, la corrélation enregistrée en prenant en compte une humidité supérieure à 60 % ne prouve aucune différence significative par rapport à celle calculée en prenant en compte une humidité supérieure à 70% ou une humidité supérieure à 80 %. Ce qui explique que la classe d'humidité qui favorise la maladie est celle supérieure à 80 % combinée à une température comprise entre 8 et 16°C et sans pluie.

**Figure 2-5- 4 : Etude de corrélation entre le nombre d’heures avec au moins 12 heures consécutives des classes associées de température, d’humidité et de la pluie (ces classes précèdent la latence) avec le taux de maladie observée (entre l’apparition de la première pustule début mai au 10 juillet) sur les trois dernières feuilles (F1, F2 et F3) entre 2000 et 2003 dans les trois sites d’essais.**

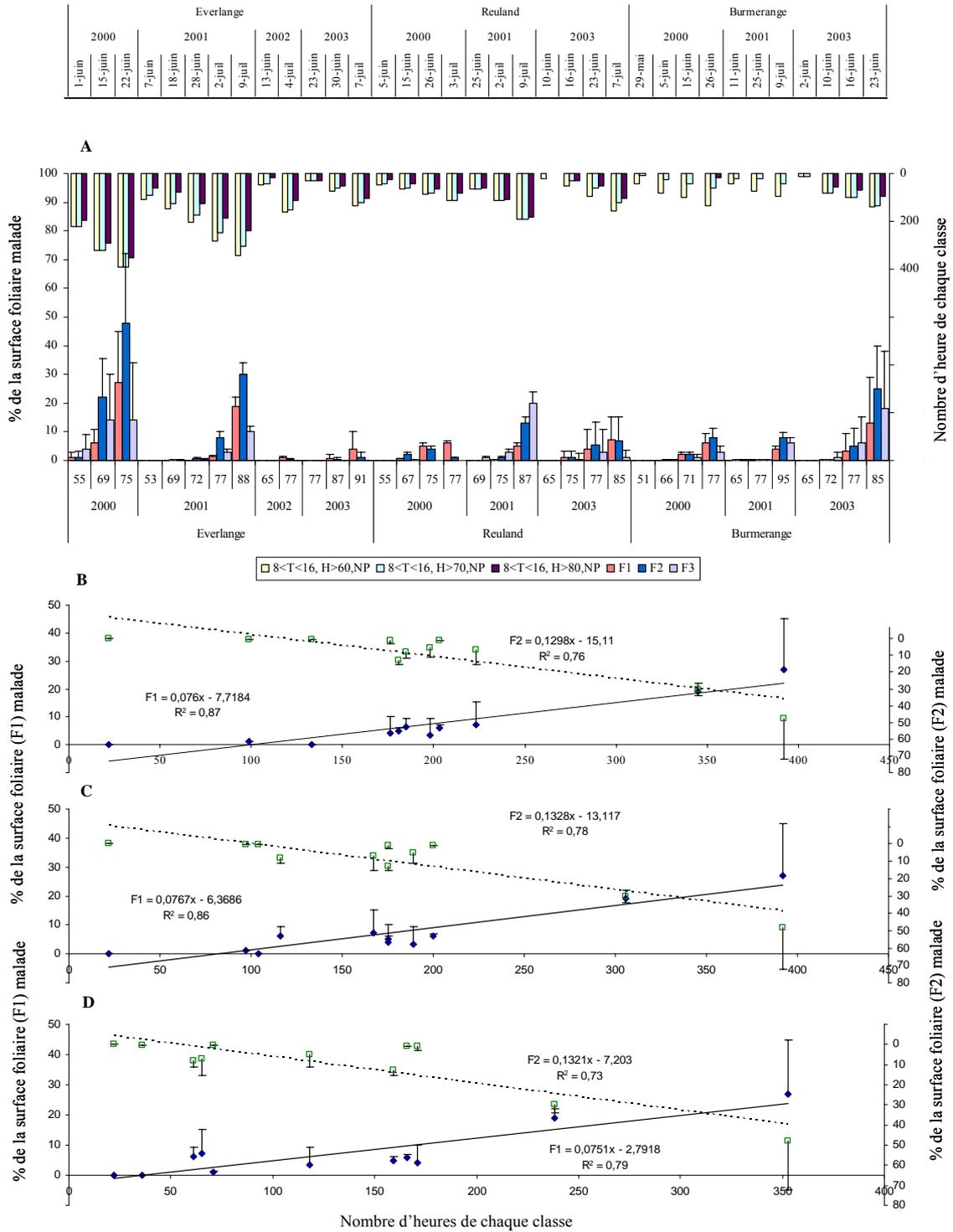
Pluie	Humidité	Température	F1	F2	F3	
Présence	H>70%	0<T<4°C	-0.25	-0.2	-0.25	
		4<T<8°C	-0.4	-0.34	-0.4	
	H>80%	0<T<4°C	-0.3	-0.26	-0.32	
		8<T<16°C	-0.02	-0.16	0	
Absence	H<60%	16<T<24°C	0.46	0.29	0.28	
		4<T<8°C	-0.5	-0.4	-0.5	
		8<T<16°C	-0.28	-0.24	-0.3	
		16<T<24°C	-0.03	-0.05	0.06	
	H>70%	16<T<24°C	-0.01	-0.03	0.08	
		4<T<8°C	-0.4	-0.4	-0.05	
		H>80%	16<T<24°C	-0.01	-0.04	0.08

Cette concordance est aussi importante lorsque le nombre d’heures consécutif est d’au moins 24 heures. Pour la F1, cette corrélation est de 0.93 ( $P < 0.05$ ) pour une humidité supérieure à 60%, de 0.93 ( $P < 0.05$ ) pour une humidité supérieure à 70 % et de 0.89 ( $P < 0.05$ ) pour une humidité supérieure à 80 %. Cette analogie entre F2 et la classe d’humidité supérieure à 60% est de 0.87 ( $P < 0.05$ ), de 0.88 ( $P < 0.05$ ) avec celle supérieure à 70 % et de 0.86 ( $P < 0.05$ ) avec celle supérieure à 80%.

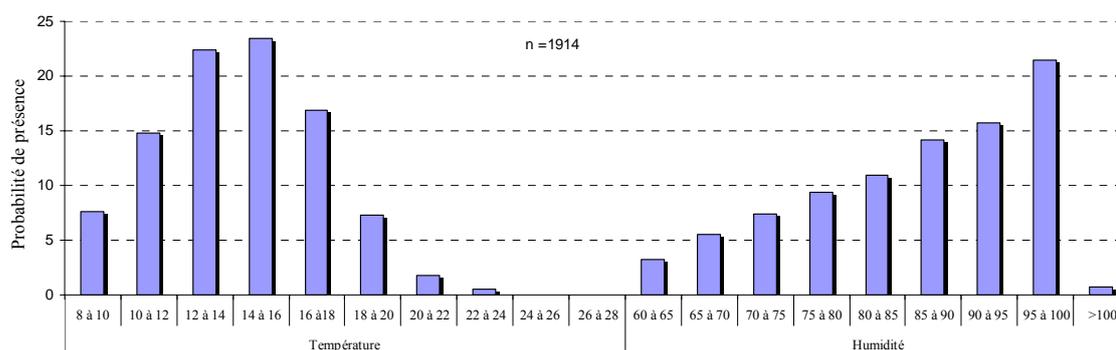
Ainsi, plus le nombre d’heures consécutives de la classe de température comprise entre 8 et 16 °C, humidité supérieure à 60 %, sans pluie est croissant, plus la sévérité de la rouille brune sera importante.

Pour déterminer les classes de températures et d’humidités optimales nocturnes qui favorisent la germination de la rouille brune, nous avons calculé le nombre d’heures consécutif (au moins 12 heures) pour une température supérieure à 8°C et une humidité supérieure à 60 % sans pluie au moment où le taux de la maladie enregistré sur la F1 et la F2 a été très important dans les trois sites d’essais entre 2000 et 2003.

Nous avons calculé la fréquence des différentes classes de températures (8 à 10°C ; 10 à 12°C ; 12 à 14°C ; 14 à 16°C ; 16 à 18°C, ...) et des différentes classes d’humidités (60 à 65 ; 65 à 70 ; 70 à 75 ; 75 à 80 ; 80 à 85 ; 85 à 90 ; 90 à 95 ; 95 à 100 et  $\geq 100$ ) sur l’ensemble d’heures nocturnes qui précèdent chaque latence (figure 2-5-5). La fin de nouvelles périodes de latence (cette période est généralement d’une semaine entre fin mai et début juillet) a été déterminée en se basant sur le test de comparaison statistique ( $\alpha = 5\%$ ) appliqué sur les valeurs observées (fréquence de 2 fois par semaine). Ainsi, les classes de conditions météorologiques nocturnes qui présentent les valeurs de fréquence importantes la décade qui précède chaque fin de latence sont les plus favorables à la germination de la rouille brune. Les résultats de cette analyse montrent que les classes avantageuses à la germination de la rouille brune sont celles avec des températures comprises entre 12 et 16 °C (47 %) et les humidités relatives optimales fluctuant entre 80 et 100 % (67 %). La fréquence des classes avec des températures supérieures à 20°C est très faible (moins de 2 %) et celle avec des humidités inférieures à 70 % ne dépasse pas 8 %.



**Figure 2-5- 5 : Superposition de la maladie et des paramètres météorologiques. A : Superposition du pourcentage de la surface foliaire présentant des symptômes de rouille brune dans chaque site et à chaque stade phénologique (entre 2000 et 2003) et le nombre d'heures des paramètres météorologiques de chaque décennie qui précède chaque période de latence. B : Ajustement entre la somme d'heure de la classe avec une température comprise entre 8 et 16°C, une humidité supérieure à 60 %, sans pluie (NP) et le niveau de maladie enregistré sur F1 (points en vert) et F2 (points en bleu) ; C : Ajustement entre la somme d'heures de la classe avec une température comprise entre 8 et 16°C, une humidité supérieure à 70%, sans pluie (NP) et le niveau de maladie enregistré sur F1 (points en vert) et F2 (points en bleu); D : Ajustement entre la somme d'heures de la classe avec une température comprise entre 8 et 16°C, une humidité supérieure à 80 %, sans pluie et le niveau de maladie enregistré sur F1 (points en vert) et F2 (points en bleu).**



**Figure 2-5- 6 : Fréquence calculée pour chaque classe de températures et d'humidités pendant la germination de la rouille brune au Grand-Duché du Luxembourg entre 2000 et 2003. (n) représente le nombre d'heures qui ont été favorables à la maladie.**

## IV. Discussions

L'approche suivie dans cette analyse ressemble à celle de la rouille jaune. C'est une approche plutôt stochastique que mécanistique. Pour expliquer le développement de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg, nous avons restreint notre étude aux périodes nocturnes, du fait que les différents contrastes entre les paramètres météorologiques peuvent être décelés facilement pendant cette période. De plus KNIGHTS & LUCAS (1980) ont mis en évidence un effet significatif de la lumière sur la réduction de la germination de la rouille. Notre étude s'est basée sur une méthode de déduction en se référant aux périodes de présence et d'absence de la maladie entre 2000 et 2003 pour déterminer les conditions propices à l'expansion de la rouille brune. Si les conditions météorologiques en conditions contrôlées sont connues (EVERSMeyer, 1988 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 1995 ; DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.*, 2000a ; SACHE, 2000), la détermination des conditions nocturnes qui favorisent la maladie n'a été jamais évoquée. Ainsi, l'étude de la fréquence de chaque classe de températures et d'humidités avec et sans pluie a permis de détecter les classes qui dominent pendant l'hiver, entre le début du tallage et la montaison et entre l'émergence des trois dernières feuilles et la maturité finale. Cette étude a montré que ce sont les températures nocturnes comprises entre 8 et 16°C associées à des humidités supérieures à 60 % rencontrées pendant au moins 12 heures consécutives qui sont à l'origine de la germination de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg. Ces dernières conditions ont été très corrélées avec chaque augmentation du pourcentage de la surface foliaire présentant des symptômes. Les classes avec des températures inférieures à 8°C et supérieures à 16°C n'ont pas eu d'effets significatifs sur la maladie. Une étude sur les conditions météorologiques (température supérieure à 8°C et humidité supérieure à 60 %, sans pluie) qui ont été à l'origine de l'accélération de la maladie pendant les quatre années d'observation a permis de calculer la fréquence de chaque classe de température combinée à l'humidité.

Cette étude a montré que la fréquence des classes de températures nocturnes comprises entre 24 et 28°C était nulle au moment de l'épidémie sur les quatre années d'étude. La fréquence des températures nocturnes comprises entre 18 et 24°C ne dépasse pas 10 %. L'analyse des heures consécutives (au moins 12 heures consécutives et au moins 24 heures consécutives) de chaque classe de températures nocturnes fait ressortir celles comprises entre 12 et 16°C (47 %) avec un optimum entre 14 et 16°C. Ces résultats sont

en accord avec ceux de CLIFFORD & HARRIS (1981); EVERSMEYER, (1988) et DE VALLAVIEILLE-POPE *et al.* (1995). La classe des températures nocturnes comprises entre 8 et 10°C est inférieure à 8% pendant la germination. Pour l'humidité, la classe dominante est celle comprise entre 80 et 100% (67 %) avec un optimum pour la classe comprise entre 95 et 100 % (20 %).

Par conséquent, les conditions météorologiques qui ont favorisé la germination de la rouille brune sont surtout les classes de températures nocturnes comprises entre 12 et 18°C avec un optimum entre 14 et 16°C associé à une humidité ambiante comprise entre 80 et 100 %. Les températures supérieures à 18°C et inférieures à 12°C ont été très faibles pendant l'évolution de la maladie. En 2000, ces conditions ont été observées à Everlange dès la fin de la troisième décennie d'avril, donc au moment de la formation des trois dernières feuilles (F1, F2 et F3). Ces conditions très favorables à l'expansion de la maladie ont coïncidé avec la présence de l'inoculum et une variété très susceptible (Bussard). Ceci a eu comme conséquence l'apparition des premières traces de la maladie dès le stade GS39 et les premiers foyers de la maladie dès le stade GS55. Entre le stade GS69 et GS77, les foyers de la maladie ont été facilement repérables. En 2001, 2002 et 2003, ces conditions favorables à la maladie n'ont été enregistrées qu'à la fin du mois de juin (début de la maturité pâteuse), d'où l'apparition tardive de la maladie. En 2000, à Reuland, le nombre d'heures où la température était comprise entre 8 et 16°C associée à une humidité supérieure à 60 % était très inférieur à celui d'Everlange et par conséquent, un taux de maladie très faible par rapport à Everlange a été observé. Cependant, en 2001, les conditions favorables à la maladie ont été plus importantes dans ce site que celles de 2000 et un taux plus important de la maladie a été mis en évidence. A Burmerange en 2003, la coïncidence d'une variété susceptible (Dekan) et de conditions météorologiques favorables pour la maladie a permis l'installation et la progression de celle-ci sur les trois derniers étages foliaires dès le stade GS65.

En définitive, cette analyse a permis de déterminer les conditions météorologiques qui assurent l'évolution de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg. Cependant, ces conditions météorologiques à elles seules ne peuvent pas assurer l'évolution de la maladie. Elles dépendent de la présence de l'inoculum de la rouille brune et d'une variété sensible à la maladie.

Dans cette étude, nous n'avons pas pris en considération la fumure azotée qui pourrait jouer un rôle très important dans la dynamique de la maladie au sein de la parcelle ; de même pour la densité à l'échelle du couvert. En effet, l'intensification de la densité de la surface foliaire permet d'augmenter le nombre de feuilles cibles disponibles pour la dispersion du parasite. De plus, la structure du couvert influence le développement des épidémies car d'une part, elle engendre un microclimat local et donc joue sur les paramètres du cycle et d'autre part, elle détermine la distance entre les organes et favorise ainsi la dispersion de la maladie dans le couvert.

Enfin, notre étude a surtout permis de comprendre les facteurs météorologiques qui influencent la rouille brune dans les conditions des champs. La mise en évidence de ces conditions météorologiques qui favorisent la maladie permettra de renforcer les avis émis par « Proculture » pour la septoriose au Grand-Duché de Luxembourg.

Des études ultérieures sont indispensables au Grand-Duché de Luxembourg et dans les pays limitrophes pour approfondir cette maladie. L'année 2000 à Everlange et 2003 dans la Moselle prouvent que cette maladie pourrait intervenir très tôt dans la saison (entre les stades GS55 et GS77). Ces études devraient se focaliser aussi sur l'interaction entre la septoriose et la rouille brune.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

- 2-5- 1 : Les différentes classes de température et d'humidité analysées entre 2000 et 2003 dans les différentes stations météorologiques étudiées..... V-3

## FIGURES

- 2-5- 1: Fréquence horaire de trois paramètres (pluie, humidité relative et température) à l'échelle de la décade dans les trois sites d'essai entre 2000 et 2003. (n) représente le nombre d'heures total qui a servi au calcul de la fréquence..... V-4
- 2-5- 2: Fréquence horaire de trois paramètres (pluie, humidité relative et température) à l'échelle de la décade entre le tallage (fin mars) et la maturité finale (début juillet) entre 2000 et 2003 dans les trois sites d'essais. A : Everlange ; B : Reuland ; C : Moselle. P : pluie ; NP : pas de pluie..... V-6
- 2-5- 3 : Variation en nombre d'heures des différentes classes combinées de température, humidité et la pluie pendant la phase de redressement et au moment de l'épidémie (10 mai à 10 juillet) entre 2000 et 2003. Les différentes classes sont superposées à la maladie observée (entre l'apparition des premiers pustules et début juillet) sur les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1)..... V-7
- 2-5- 4 : Etude de corrélation entre le nombre d'heures avec au moins 12 heures consécutives des classes associées de température, d'humidité et de la pluie (ces classes précèdent la latence) avec le taux de maladie observée (entre l'apparition de la première pustule début mai au 10 juillet) sur les trois dernières feuilles (F1, F2 et F3) entre 2000 et 2003 dans les trois sites d'essais..... V-8
- 2-5- 5 : Superposition de la maladie et des paramètres météorologiques. A : Superposition du pourcentage de la surface foliaire présentant des symptômes de rouille brune dans chaque site et à chaque stade phénologique (entre 2000 et 2003) et le nombre d'heures des paramètres météorologiques de chaque décade qui précède chaque période de latence. B : Ajustement entre la somme d'heure de la classe avec une température comprise entre 8 et 16°C, une humidité supérieure à 60 %, sans pluie (NP) et le niveau de maladie enregistré sur F1 (points en vert) et F2 (points en bleu) ; C : Ajustement entre la somme d'heures de la classe avec une température comprise entre 8 et 16°C, une humidité supérieure à 70%, sans pluie (NP) et le niveau de maladie enregistré sur F1 (points en vert) et F2 (points en bleu); D : Ajustement entre la somme d'heures de la classe avec une température comprise entre 8 et 16°C, une humidité supérieure à 80 %, sans pluie et le niveau de maladie enregistré sur F1 (points en vert) et F2 (points en bleu)..... V-9
- 2-5- 6 : Fréquence calculée pour chaque classe de températures et d'humidités pendant la germination de la rouille brune au Grand-Duché du Luxembourg entre 2000 et 2003. (n) représente le nombre d'heures qui ont été favorables à la maladie..... V-10

## REFERENCES

- CHANG, H. S., L. CALPOUZOS & R. D. WILCOXSON (1973). "Germination of hydrated uredospores of *P.recondita* inhibited by light." *Can.J.Bot.* **51**: 2459-2461.
- CLIFFORD, B. C. & R. G. HARRIS (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.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., L. HUBER, M. LECONTE & H. GOYAU (1995). "Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration and infection of *P. recondita* f. sp. *tritici* and *P. striiformis* on wheat seedlings." *Phytopathology* **85**: (4) 409-415.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., J. ROUZET, M. LECONTE, M. DELORS & M. N. MISTON (2000a). "La rouille jaune du blé en France. Des épidémies déclenchées par une nouvelle race, un hiver doux et un printemps humide." *Phytoma. La défense des végétaux* **527**: 22-29.
- DE VALLAVIEILLE-POPE, C., S. GIOSUC, L. MUNK, A. C. NEWTON, R. E. NIKS, H. OSTERGARD, J. PONS-KUHNEMANN, V. ROSSI & I. SACHE (2000b). "Evaluation de paramètres épidémiologiques et leur utilisation dans les épidémies et les modèles de prédiction de maladies de céréales aéroportées." *Agronomie* **20**: 715-727.
- EVERSMAYER, M. G. (1988). "Environmental influences on the establishment of *Puccinia recondita* infection structures." *Plant disease* **72**: 409-412.
- HAU, B. & C. DE VALAVIEILLE-POPE (1998). Wind-dispersal diseases. *In The epidemiology of plant diseases*. E. D. G. J. K. A. Publishers. Dordrecht. Ed. pp. 323-347.
- MAC GREGOR, A. J. & J. C. MANNERS (1976). *Some effects of lights on the growth of yellow rust on wheat*. Proc. Eur. and Med. cereal rust conf. Interlaken. pp. 56-66.
- PARLEVLIET, J. E. (1979). "Components of resistance that reduce the rate of epidemic development." *Annual Review of Phytopathology* **17**: 203-222.
- SACHE, I. (1997). "Effect of density and age of lesions on sporulation capacity and infection efficiency in wheat leaf rust (*Puccinia recondita* f. sp. *tritici*)." *Plant Pathology* **46**: 581-589.
- SACHE, I. (2000). "Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain." *Agronomie* **20**: 757-767.
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG & C. F. KONZAK (1974). "A decimal code for the growth stages of cereals weeds." *Research* **14**: 415-421.

---

## CHAPITRE VI

### ANALYSE CONCEPTUELLE DES COMPOSANTES MICROCLIMATIQUES

---

L'évolution d'un parasite cryptogamique varie dans l'espace. Cette variation dépend essentiellement des conditions météorologiques qui diffèrent d'un endroit à un autre. Au sein d'une même région, des fluctuations importantes de certaines maladies (rouille brune, septoriose, oïdium, ...) peuvent être enregistrées dans des endroits à caractéristiques topographiques distinctes (plateau, fond de vallée, pente, ...). Les méthodes classiques basées sur l'étude de corrélation des données horaires des stations météorologiques du Grand-Duché de Luxembourg ne permettent pas de déceler les différentes amplitudes des principaux paramètres météorologiques affectant les maladies cryptogamiques du blé d'hiver. Dans ce travail, les données horaires ont été décomposées par une transformation de Fourier en un ensemble de séries (Intraday, Diurnal, Synoptic et Seasonal). Cette décomposition de données permet de visualiser les divers gradients de température, d'humidité et de pluie entre les sites étudiés. Les changements de fluctuations intrajournalières qui existent entre les sites ou au sein d'un même site à caractéristiques topographiques différentes permettent de comprendre et d'expliquer les variations des maladies cryptogamiques. A long terme, il sera possible, avec cette méthode de décomposition, d'établir et d'automatiser des cartes de risques d'infection des parasites cryptogamiques du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg en fonction de la variation du gradient de chaque paramètre météorologique.

---

#### I. Introduction

Les conditions météorologiques exercent une influence déterminante sur les maladies des plantes. La réussite des différentes phases d'une épidémie dépend étroitement d'événements microclimatiques précis. C'est le climat qui gouverne en grande partie les changements quantitatifs d'états aux niveaux du parasite, de la maladie, de l'épidémie mais aussi de la population hôte.

La mise en place d'un réseau opérationnel pour les avertissements du moment optimal du traitement fongicide pour le Grand-Duché de Luxembourg nécessite un réseau de stations météorologiques représentatif de tout le territoire. 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.

En effet, les paramètres météorologiques présentent une grande variabilité spatiale, principalement liée aux irrégularités topographiques. Aucun réseau de mesures ne pouvant assurer une couverture suffisamment dense pour assurer la surveillance de tous les topo-climats existant au Grand-Duché de Luxembourg, il est impératif de recourir à des méthodes statistiques plus ou moins sophistiquées pour analyser la variation des paramètres météorologiques entre les différentes stations du réseau luxembourgeois.

Les champs pluviométriques sont, avec les températures, les deux variables météorologiques les plus communément suivies à travers le réseau d'observations de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA). Depuis peu, les

champs pluviométriques du Grand-Duché de Luxembourg peuvent également être étudiés à une haute résolution spatio-temporelle grâce au radar de l'Institut Royal Météorologique installé à Libramont, alors que les stations météorologiques donnent seulement une information ponctuelle en un nombre très limité de points.

L'étude épidémiologique des principales maladies qui ont été enregistrées a montré une grande variation entre les sites d'essais au Grand-Duché de Luxembourg. Chaque maladie a ses exigences spécifiques en nombre d'heures de durée d'humectation, d'humidité relative, de température et de pluie qui peuvent varier d'un site à l'autre. Cependant, l'étude de simples corrélations entre les stations météorologiques ne permet pas de déceler cette variation. Ainsi, l'objectif de ce travail est de proposer une méthodologie qui permet de spécifier le microclimat lié à chaque station et à chaque région du Grand-Duché de Luxembourg.

## II. Matériels et méthodes

Ce travail a été réalisé grâce à la collaboration du Professeur Steven Porter de l'Université de Idaho aux Etats-Unis. Il nous a autorisé, par une communication personnelle, d'utiliser sa méthodologie de comparaison entre stations météorologiques. La méthode conceptuelle utilisée dans ce travail est fondée sur une fonction mathématique de transformation appelée  $K_Z$  qui se base sur un filtre linéaire  $q$ . Ce filtre linéaire est une moyenne mobile de  $k$  pas de temps. Ainsi, la fonction  $K_Z$  est identifiée sous l'abréviation  $K_Z(X, q, k)$  pour chaque station météorologique avec :

- $X$  : variable mesurée au niveau de la station météorologique ;
- $q$  : filtre linéaire utilisé dans l'analyse (dans cette étude, c'est la moyenne mobile),  $q_0$  varie entre  $-q$  et  $+q$ ;
- $k$  : itérations (dans cette étude,  $k$  est compris entre 1 et 3 qui correspond au nombre de filtres successifs).

### II.1. Principe de la méthode

Notre méthode est fondée sur la comparaison des séries filtrées établies à partir des séries originales grâce à des moyennes mobiles se basant sur la fonction  $K_Z$ . Cette fonction  $K_Z$  peut être exprimée en termes de transformation de Fourier faisant intervenir une série d'équations avec une fréquence de  $\frac{1}{2} \Delta t$  [l'échelle de temps minimum est de 2 heures ( $\Delta t = 1$  heure)]. La transformation de Fourier ( $B$ ) est appelée « la fonction de transfert » du filtre linéaire  $q$ .  $|B|^2$  décrit comment l'énergie (variance) est transférée de  $X$  (série originale) à  $Y$  (la série filtrée). Donc,  $B$  décrit comment l'amplitude (l'écart type) est transférée de  $X$  (la série originale) à  $Y$  (la série filtrée). Ainsi, grâce à cette fonction  $K_Z$  et au filtre  $q$ , il est possible de décomposer chaque paramètre mesuré par une station météorologique en une série de données filtrées. Selon la valeur du filtre linéaire, l'amplitude du paramètre analysé pourrait être visualisé à l'intérieur de la journée (Intraday), sur 24 h (diurnal), intrasaisonnière (synoptic) et saisonnière (seasonal). La valeur du filtre est petite pour les petites variations ( $q = 1$  pour la variation intraday) et augmente au fur et à mesure que la variation devient importante (figure 2-6-1).

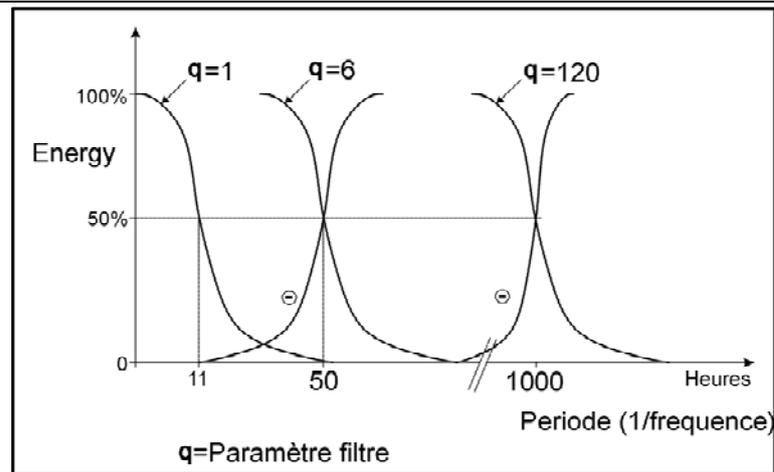


Figure 2-6- 1 : Schéma représentant la variation de filtres en fonction de différentes périodes.

Cette décomposition des données originales en données filtrées permet de bien visualiser les contrastes qui existent entre les stations météorologiques à comparer pour un même paramètre météorologique. L'analyse de ces contrastes à l'échelle horaire donnerait plus d'indications et d'explications sur les différentes conditions météorologiques enregistrées dans les différents sites. Certains parasites sont très sensibles aux variations journalières (rouille jaune) et nocturnes (rouille brune) de la température pendant les périodes humides. Avec l'analyse des contrastes, il est possible de comprendre pourquoi l'évolution d'un parasite diffère d'un site à l'autre. Pour montrer l'originalité de ce type d'analyse qui n'a jamais été abordé auparavant, nous avons réalisé une analyse sur les conditions favorables à la septoriose appelées « conditions contrôlées » à Reuland et Everlange pour l'année 2000. Ces conditions contrôlées sont :

- Température comprise entre 4 et 20°C pendant 18 heures au moins ;
- Humidité relative supérieure à 60 % pendant 18 heures au moins ;
- Pluie supérieure ou égale à 0.1 mm pendant la première heure et supérieure ou égale à 0.5 mm pendant la deuxième heure.

Ces conditions contrôlées correspondent au nombre d'heures pour lesquelles les limites fixées pour les trois éléments sont réunies. Ces conditions ont été comparées avec les variations (Intrday, Diurnal, Synoptic et Seasonal) pour déterminer les amplitudes journalières qui régissent le parasite.

Enfin, cette analyse permet aussi de justifier l'emplacement d'une station par rapport à une autre. Pour comprendre l'importance de cette méthodologie dans la mise en place d'un système opérationnel, nous avons comparé pour deux stations météorologiques, les séries originales entre elles et les séries filtrées entre elles. Notre analyse s'est basée sur une étude de corrélation accompagnée de tests de signification.

## II.2. Conception de la méthode.

Cette analyse conceptuelle a été développée sur les données météorologiques horaires d'Everlange et Reuland entre le 30 septembre 1999 et le 22 juillet 2000 et celles des différentes stations appartenant au réseau météorologique de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) entre le 6 avril 2001 et le 5 février 2002. Le calcul de la série filtrée a été basé sur le filtre linéaire  $q$  dans une fenêtre égale à  $2q + 1$  avec trois filtres successifs ( $k$ ).

### II.2.1. Equations

$$Y_t = \frac{1}{2q+1} \sum_{i=-q}^{+q} X_{t-i} \quad \text{(Equation 2-6-1)}$$

[t = time (heures) ; i = index ; q = paramètre filtre;  $X_t$  = la valeur réelle au moment j et  $Y_t$  = la valeur prévue au moment t]

$$Z_t = \frac{1}{2q+1} \sum_{i=-q}^{+q} Y_{t-i} \quad \text{(Equation 2-6-2)}$$

$$W_t = \frac{1}{2q+1} \sum_{i=-q}^{+q} Z_{t-i} \quad \text{(Equation 2-6-3)}$$

Les équations 2-6-1 à 2-6-3 se résument de la façon suivante pour les trois paramètres (température (t), pluie (ra) et humidité relative (rh)) :

$$t_{13} = K_Z(t, 1, 3) ; rh_{13} = K_Z(rh, 1, 3) ; ra_{13} = K_Z(ra, 1, 3) ;$$

$\swarrow$        $\searrow$        $\swarrow$        $\searrow$   
 (q=1 K=3      q=1 K=3)

$$t_{63} = K_Z(t, 6, 3) ; rh_{63} = K_Z(rh, 6, 3) ; ra_{63} = K_Z(ra, 6, 3) ; \quad (q = 6, K = 3)$$

$$t_{120} = K_Z(t, 120, 3) ; rh_{120} = K_Z(rh, 120, 3) ; ra_{120} = K_Z(ra, 120, 3) ; \quad (q = 120, K = 3)$$

### II.2.2. Variation Intraday

La variation Intraday représente la tendance de chaque paramètre à l'intérieur de la journée par rapport à une moyenne mobile de filtres q=1 (figures 2-6-1, 2-6-2).

La variation intraday est notée  $W_{id}$  et se calcule par l'équation 2-6-4 :

$$W_{id} = X_t - W_t (q = 1) \quad \text{(Equation 2-6-4)}$$

L'équation 2-6-4 s'écrit de la façon suivante pour les trois paramètres (température, pluie et humidité) :

$$\text{Equation 2-6-4 : } t_{id} = t - t_{13} ; rh_{id} = rh - rh_{13} ; ra_{id} = ra - ra_{13} ;$$

### II.2.3. Variation Diurnal

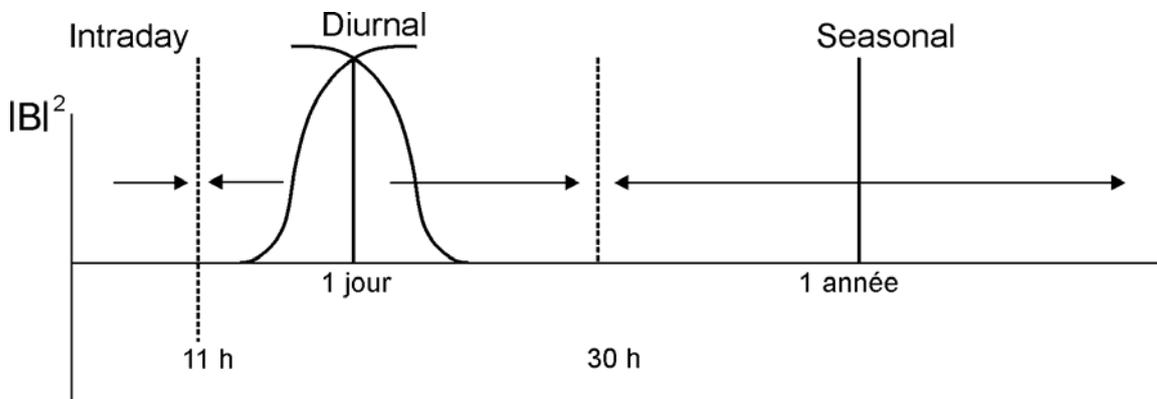


Figure 2-6- 2 : Schéma des différentes variations météorologiques.

La variation Diurnal représente la tendance du paramètre étudié entre 11 et 48 heures qui suit en général l'ensemble des variations Intraday (figure 2-6-2). Cette variation notée  $W_{DU}$  se calcule par l'équation 2-8-5 :

$$\boxed{W_{DU} = W_t(q=1) - W_t(q=6)} \quad (\text{Equation 2-6-5})$$

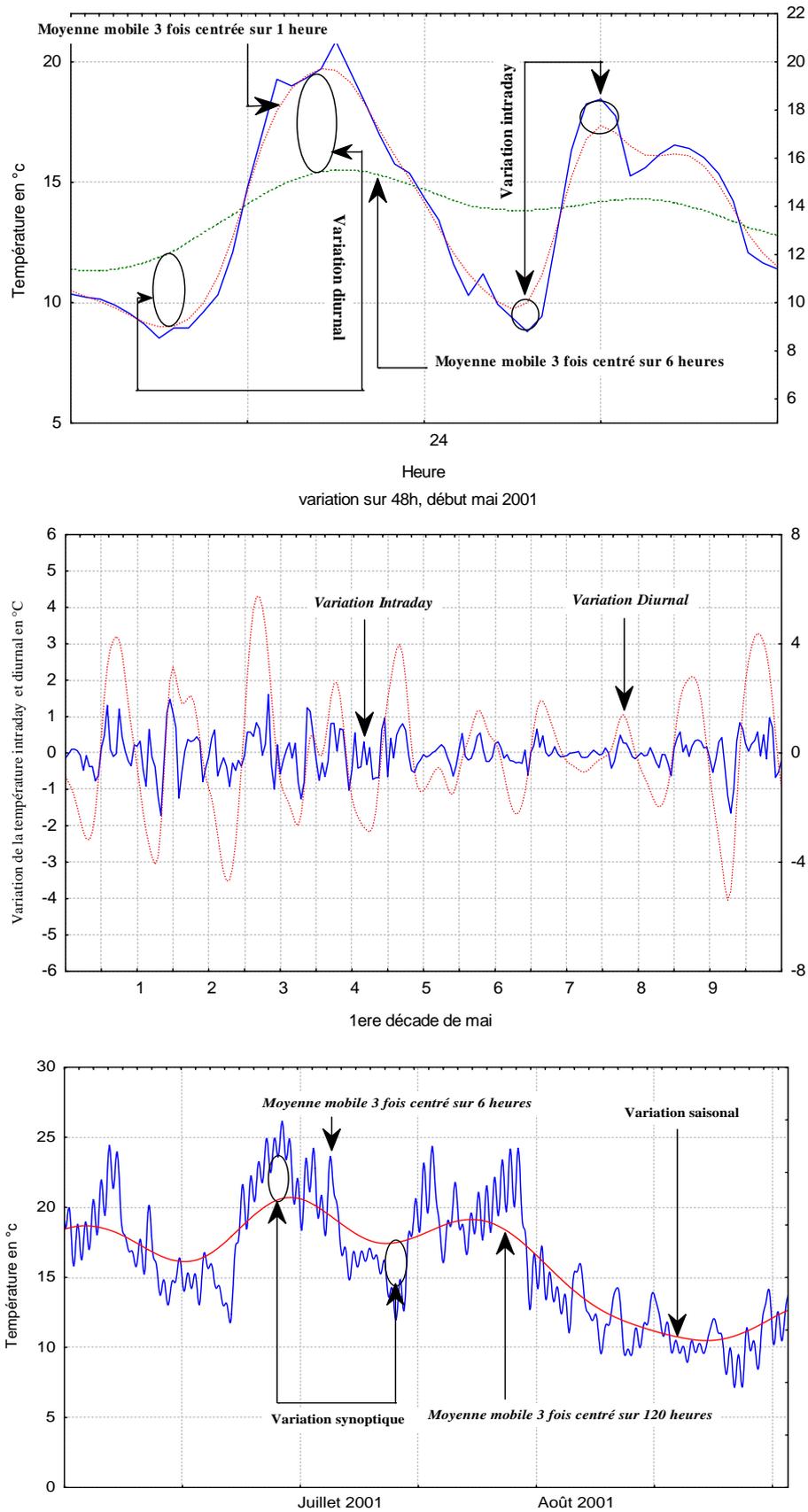
Ainsi, l'équation 2-6-5 s'écrit de la façon suivante pour les trois paramètres (température, pluie et humidité) :

$$t_{DU} = t_{24} = t_{13} - t_{63} ; rh_{24} = rh_{13} - rh_{63} ; ra_{24} = ra_{13} - ra_{63} \quad (\text{Equation 2-6-5})$$

Les deux variations Intraday et Diurnal sont dépendantes d'une série d'équations appelées équation de Fourier (PORTER, 2001) :

$$\begin{cases} t_{id} = t - t_{13} \\ t_{DU} = t_{13} - t_{63} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} t_{13} = t - t_{id} \\ t_{DU} = t - (t_{id} + t_{63}) \end{cases}$$

Ces deux variations sont calculées par un jeu de moyennes mobiles avec deux filtres 1 et 6 (figures 2-6-3 A et B).



**Figure 2-6- 3 : Méthodologie de détermination des différentes variations. A : Calcul de la variation intraday et diurnal ; B : Représentation de la variation intraday et diurnal ; C : Calcul de la variation synoptique et seasonal (station d’Useldange entre 6 avril 2001 et 5 février 2002).**

### II.2.4. Variation Intrasaisonnière (Synoptic)

La variation synoptique notée  $W_{SY}$  représente la tendance du paramètre étudié sur une période comprise entre 48 heures et 40 jours.  $W_{SY}$  est calculé par l'équation 2-6-6 :

$$\boxed{W_{SY} = W_t(q = 6) - W_t(q = 120)} \quad (\text{Equation 2-6-6})$$

Pour les trois paramètres (température, pluie et humidité), l'équation 2-6-6 devient la suivante :  $t_{SY} = t_{63} - t_{120}$  ;  $rh_{SY} = rh_{63} - rh_{120}$  ;  $ra_{SY} = ra_{13} - ra_{120}$  ;

$W_{SY}$  peut être calculé à partir des variations Intraday et Diurnal par :

$$\begin{cases} t_{DU} = t_{13} - t_{63} = t - (t_{id} + t_{63}) \\ t_{SY} = t_{63} - t_{120} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} t_{SY} = t - (t_{id} + t_{DU} + t_{120}) \end{cases}$$

Cette variation représente la tendance générale d'un paramètre entre la variation à court terme (Intraday et Diurnal) et la variation à long terme (seasonal) (figure 2-6-3 C).

$W_{SY}$  est un lissage qui représente les oscillations du paramètre étudié à moyen terme.

### II.2.5. Variation seasonal

La variation Seasonal notée  $W_{LO}$  (équation 2-6-7) représente la tendance du paramètre étudiée sur une longue période (moyenne mobile avec filtre  $q = 120$ ).

$$\boxed{W_{LO} = W_t(q = 120)} \quad (\text{Equation 2-6-7}).$$

Cette équation s'écrit de la façon suivante pour les trois paramètres (température, pluie et humidité) :

$$t_{LO} = t_{120} ; rh_{LO} = rh_{120} ; ra_{LO} = ra_{120} ;$$

L'intérêt de ce lissage est de visualiser les amplitudes de chaque paramètre mesuré et de voir sa tendance au sein de chaque station. Ce lissage est donc une représentation des diverses oscillations du paramètre sur différentes échelles de temps. Une série de données originales peut être décrite comme la somme de données lissées:

Exemple : température

$$\begin{cases} t_{id} = t - t_{13} \\ t_{DU} = t_{13} - t_{63} \\ t_{SY} = t_{63} - t_{120} \\ t_{LO} = t_{120} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} t = t_{id} + t_{13} \\ t_{13} = t_{DU} + t_{63} \\ t_{63} = t_{SY} + t_{120} \\ t_{LO} = t_{120} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} t = t_{id} + (t_{DU} + t_{63}) \\ t_{63} = t_{SY} + t_{120} \\ t_{LO} = t_{120} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} t = t_{id} + t_{DU} + t_{SY} + t_{LO} \end{cases}$$

## II.3. Méthode de périodogramme

Afin de visualiser le spectre émis par chaque série pour chaque variation et pour chaque type de données, nous nous sommes référés à la méthode de périodogramme. Cette méthode est une technique graphique d'analyse de données pour examiner des modèles de fréquences dans des intervalles de temps égaux.

Une série chronologique dans un intervalle de temps égal est une série dans laquelle la distance entre les points adjacents est constante (LOMB, 1976 ; HORNE & BALIUNAS, 1986). Le périodogramme est un outil naturel pour l'analyse spectrale d'une série temporelle stationnaire du second ordre. La littérature sur les séries temporelles donne grand nombre de propriétés, principalement asymptotiques, que le signal soit à

dépendance courte ou longue. Le périodogramme (ou spectrum) pour une série de temps  $x_t$  est (FAY, 2000) :

$$S(f) = \frac{\Delta}{n} \left( \left( \sum_{t=-n}^{n-1} x_t \cos(2\pi f_t \Delta) \right)^2 + \left( \sum_{t=-n}^{n-1} x_t \sin(2\pi f_t \Delta) \right)^2 \right)$$

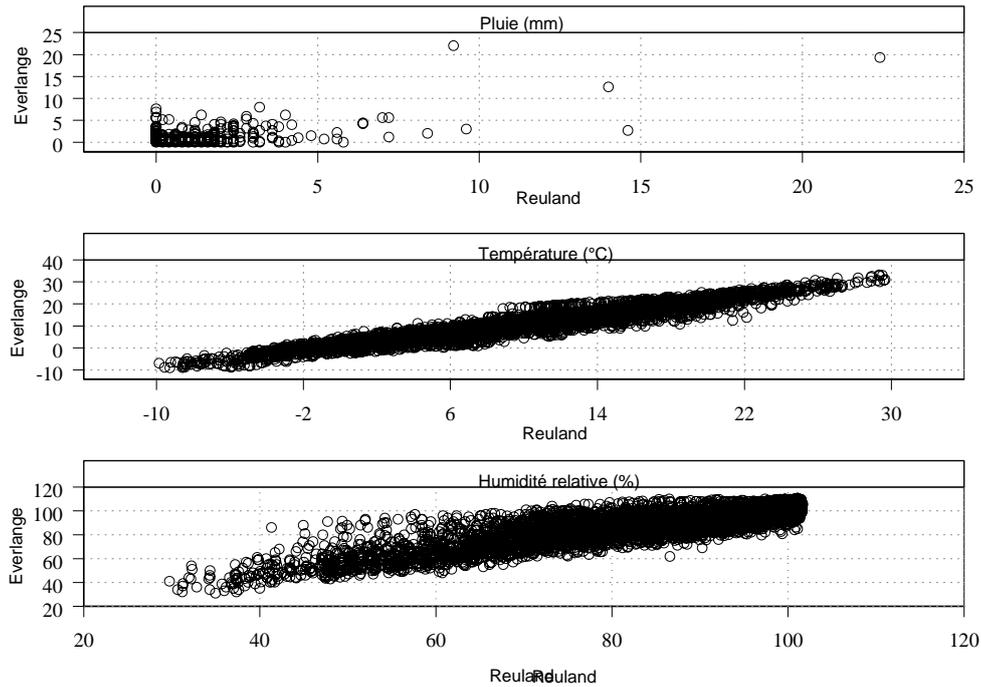
Où  $f$  est la fréquence,  $n$  est le nombre d'observations dans la série chronologique,  $\Delta$  est  $(n + 1) / 2$  pour  $n$  impair et  $(n + 2) / 2$  pour  $n$  pair.

Lorsque la variable étudiée évolue périodiquement, le spectre est discret, c'est-à-dire caractérisé par un nombre fini de fréquences (raies distinctes). La fréquence de base, qui définit la périodicité principale de l'onde, est appelée fondamentale. Les autres fréquences sont les harmoniques (harmoniques 2, 3, 4, ...) pour les fréquences doubles, triples, quadruples de la fondamentale (NICOLAS, 2003).

### III. Résultats

#### III.1. Données horaires

L'analyse des données horaires de température, humidité relative et pluie (figure 2-6-4), entre Everlange et Reuland ne révèle pas de différences significatives entre les deux stations pour la température et l'humidité relative en 2000. Cependant, la dispersion des nuages de points de température et particulièrement de l'humidité montre un ensemble de points qui sortent de la droite d'ajustement. Ceci montre que des écarts de température et d'humidité sont enregistrés entre les deux stations. Seulement, l'étude de corrélation sur l'ensemble des données horaires ne permet pas de visualiser ces écarts (tableau 2-8-1). La corrélation est très élevée ( $r = 0.96$ ,  $P < 0.05$ ) entre d'une part la température horaire d'Everlange et de Reuland et d'autre part, l'humidité horaire d'Everlange et Reuland ( $r = 0.86$ ,  $P < 0.05$ ). Les changements horaires de température et d'humidité entre les deux stations pour la période d'étude sont très faibles alors que pour la pluie, la différence est remarquable. Ces changements de pluie peuvent s'expliquer par le temps nécessaire aux masses nuageuses pour se déplacer d'un site à l'autre, par le caractère très local de certaines pluies (orages), par l'effet de continentalisation qui se marque vers le sud.



**Figure 2-6- 4 : Corrélation entre Everlange et Reuland en 2000 pour trois paramètres météorologiques horaires (humidité relative en %, température en °C et pluie en mm).**

### III.2. Variation Intraday

Cette variation Intraday permet de bien visualiser les contrastes qui existent entre deux stations à comparer pour un même paramètre météorologique (figure 2-6-5, A<sub>1</sub> et A<sub>2</sub>). Cette différence d’amplitude observée de la température et de l’humidité pourrait s’expliquer par une différence topographique des deux stations et leur exposition (Nord, Sud). L’analyse de corrélation (tableau 2-6-1) renforce l’hypothèse énoncée ci-dessus. Le faible coefficient de corrélation enregistré en comparant la variation de la température et de l’humidité Intraday entre Everlange et Reuland ne pourrait s’expliquer que par une différence topoclimatologique entre les deux sites. Cette étude de corrélation entre stations pourrait se faire en fonction du temps pour permettre de mieux visualiser le moment où la différence entre stations est très remarquable et vice versa (figure 2-6-6). Le coefficient de corrélation entre la variation Intraday de la pluie à Everlange et Reuland est aussi faible à moyenne.

### III.3. Variation Diurnal

Cette variation représente celle enregistrée sur 24 heures (équation 2-6-5). La série Diurnal met en évidence certaines fluctuations de l’amplitude de la température, de l’humidité de l’air (figure 2-6-5, B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>) et de la pluie mais cette variation n’est pas aussi importante que celle donnée par la série Intraday (tableau 2-6-1).

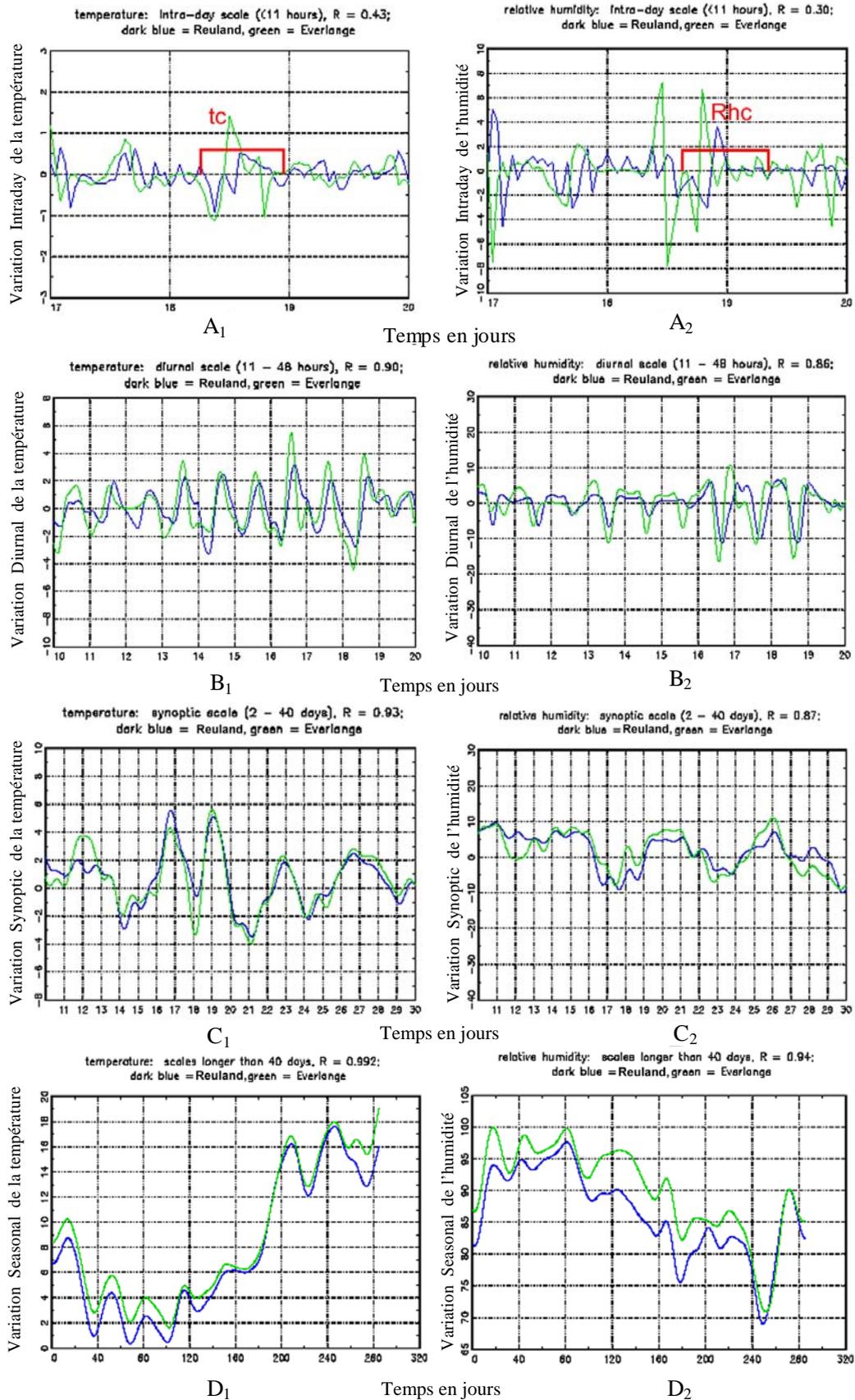
Cette étude permet en outre de visualiser les différents évolutions du coefficient de corrélation en fonction du temps, ce qui permettrait d’expliquer les moments où les divergences entre les stations sont importantes (figure 2-6-6). Sur une période de 24 heures, la pluie est souvent enregistrée dans les deux sites mais à l’intérieur de la journée la dispersion est beaucoup plus grande. Il pleut dans un site et il faut attendre un laps de temps pour qu’il pleuve dans l’autre et vice versa, ce qui explique le grand écart Intraday.

**Tableau 2-6- 1 : Matrice de corrélation de la température, de l'humidité relative et la pluie entre Everlange et Reuland en 2000 pour les différentes variations (horaire, intraday, diurnal, synoptic et seasonal).**

			Everlange			Reuland			
			Température	Humidité	Pluie	Température	Humidité	Pluie	
			Horaire			Horaire			
<b>Everlange</b>	Température	<b>Horaire</b>	1						
	Humidité		-0.6	1					
	Pluie		0.06	0.02	1				
<b>Reuland</b>	Temperature		0.96	-0.54	0.06	1			
	Humidité		-0.47	0.87	0.03	-0.5	1		
	Pluie		0.06	0.09	0.6	0.04	0.13	1	
<b>Intraday</b>									
<b>Everlange</b>	Température		<b>Intraday</b>	1					
	Humidité			-0.67	1				
	Pluie	-0.06		0.08	1				
<b>Reuland</b>	Temperature	0.43		-0.4	-0.06	1			
	Humidité	-0.24		0.3	0.04	-0.7	1		
	Pluie	-0.05		0.06	0.5	-0.1	0.1	1	
<b>Diurnal</b>									
<b>Everlange</b>	Température	<b>Diurnal</b>		1					
	Humidité			-0.9	1				
	Pluie		0.04	-0.003	1				
<b>Reuland</b>	Temperature		0.9	-0.85	0.058	1			
	Humidité		-0.8	0.86	0.007	-0.88	1		
	Pluie		0.025	0.028	0.7	0.04	0.06	1	
<b>Synoptic</b>									
<b>Everlange</b>	Température		<b>Synoptic</b>	1					
	Humidité			-0.12	1				
	Pluie	0.28		0.12	1				
<b>Reuland</b>	Temperature	0.93		-0.11	0.25	1			
	Humidité	-0.11		0.87	0.09	-0.2	1		
	Pluie	0.24		0.26	0.77	0.16	0.27	1	
<b>Seasonal</b>									
<b>Everlange</b>	Température	<b>Seasonal</b>		1					
	Humidité			-0.79	1				
	Pluie		0.28	-0.13	1				
<b>Reuland</b>	Temperature		0.99	-0.82	0.22	1			
	Humidité		-0.68	0.94	0.05	-0.74	1		
	Pluie		0.14	0.11	0.88	0.078	0.25	1	
<b>Conditions contrôlées</b>									
<b>Everlange</b>	Température		<b>Conditions contrôlées</b>	1					
	Humidité			0.22	1				
	Pluie	0.03		0.01	1				
<b>Reuland</b>	Temperature	0.64		0.06	-0.01	1			
	Humidité	0.23		0.82	0.02	0.09	1		
	Pluie	0.09		0.1	0.27	0.05	0.1	1	

### III.4. Variation Synoptic

Cette variation est calculée sur une période de 2 à 40 jours (équation 2-6-6). Les écarts de température et de l'humidité relative (figure 2-6-5,  $C_1$  et  $C_2$ ) sont très négligeables (tableau 2-6-1). Les contrastes entre les paramètres météorologiques sont nettement remarquables à l'intérieur du jour et ils diminuent au fur et à mesure que la période étend.



**Figure 2-6- 5 : Différentes variations de la température et de l'humidité à Everlange et Reuland en 2000. A : Variation Intraday ; B : Variation Diurnal ; C : Variation Synoptic ; D : Variation Seasonal. Légende : tc = température contrôlée ; Rhc = humidité relative contrôlée.**

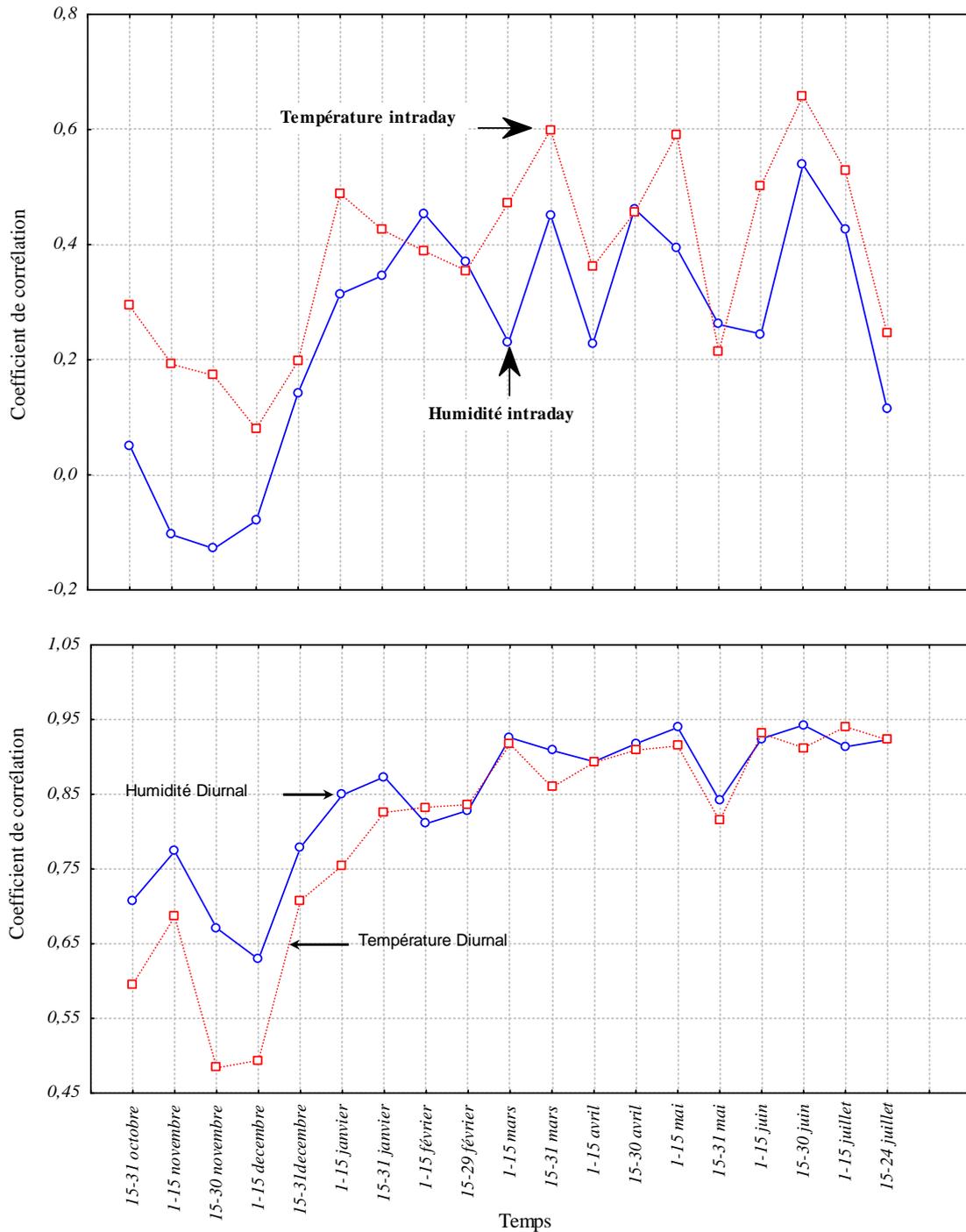


Figure 2-6- 6 : Variation du coefficient de corrélation entre Everlange et Reuland pour les deux variations Intraday et Diurnal en fonction du temps en 2000. Le coefficient de corrélation a été calculé sur des données horaires sur une période de 15 jours.

### III.5. Variation Seasonal

La variation Seasonal de température et de l'humidité (figure 2-6-5, D<sub>1</sub> et D<sub>2</sub>) et de la pluie (tableau 2-6-1) à Everlange est similaire à celle de Reuland. Ce résultat semble très logique et confirme les idées qui ont été évoquées lors de l'analyse de chaque variation.

### III.6. Conditions contrôlées

La corrélation entre la température (entre 4 et 20°C pendant au moins 18 heures) à Everlange et à Reuland est positive mais de qualité moyenne (tableau 2-6-1), ce qui signifie que ce paramètre change dans les conditions contrôlées par rapport aux conditions normales ( $r = 0.96$  ;  $P < 0.05$ ) d'un site à l'autre. Cependant, pour le paramètre "humidité" la corrélation entre Everlange et Reuland est proche de celle mesurée dans les conditions normales. La différence entre les deux sites est très remarquable pour le paramètre pluie ( $r = 0.27$ ). Or, ce paramètre est le leitmotiv de l'évolution en gradient de la septoriose, ce qui démontre la nécessité d'être attentif lors de l'implantation de stations météorologiques, surtout des pluviomètres. Remarquons que cette méthode permet de déceler les variations de conditions météorologiques favorables à la septoriose. En utilisant cette méthode, il sera possible de déterminer les limites géographiques que peut couvrir une station météorologique et d'établir par la suite des cartes de risque de septoriose pour le Grand-Duché de Luxembourg.

## IV. Discussion

La méthode de périodogramme de la variation de la température horaire à Useldange permet de déceler la fréquence de base et les différentes harmoniques enregistrées dans la fréquence fondamentale (figure 2-6-7).

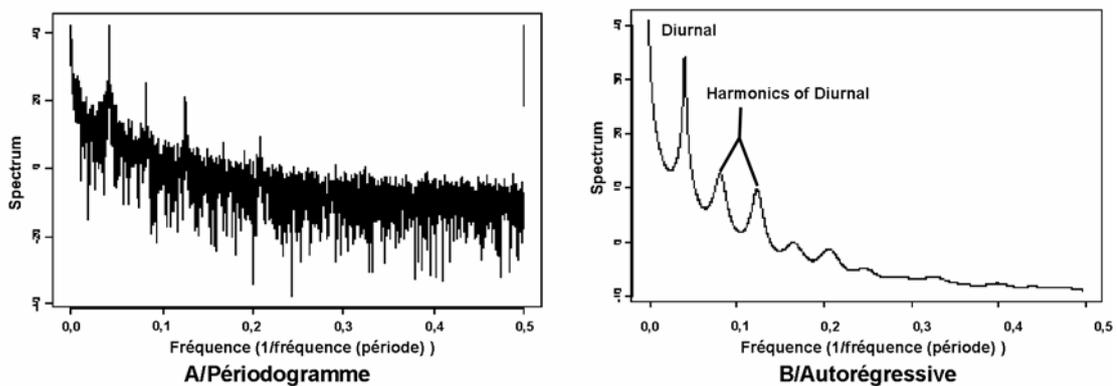


Figure 2-6- 7 : Périodogramme de la variation de la température horaire à Useldange.

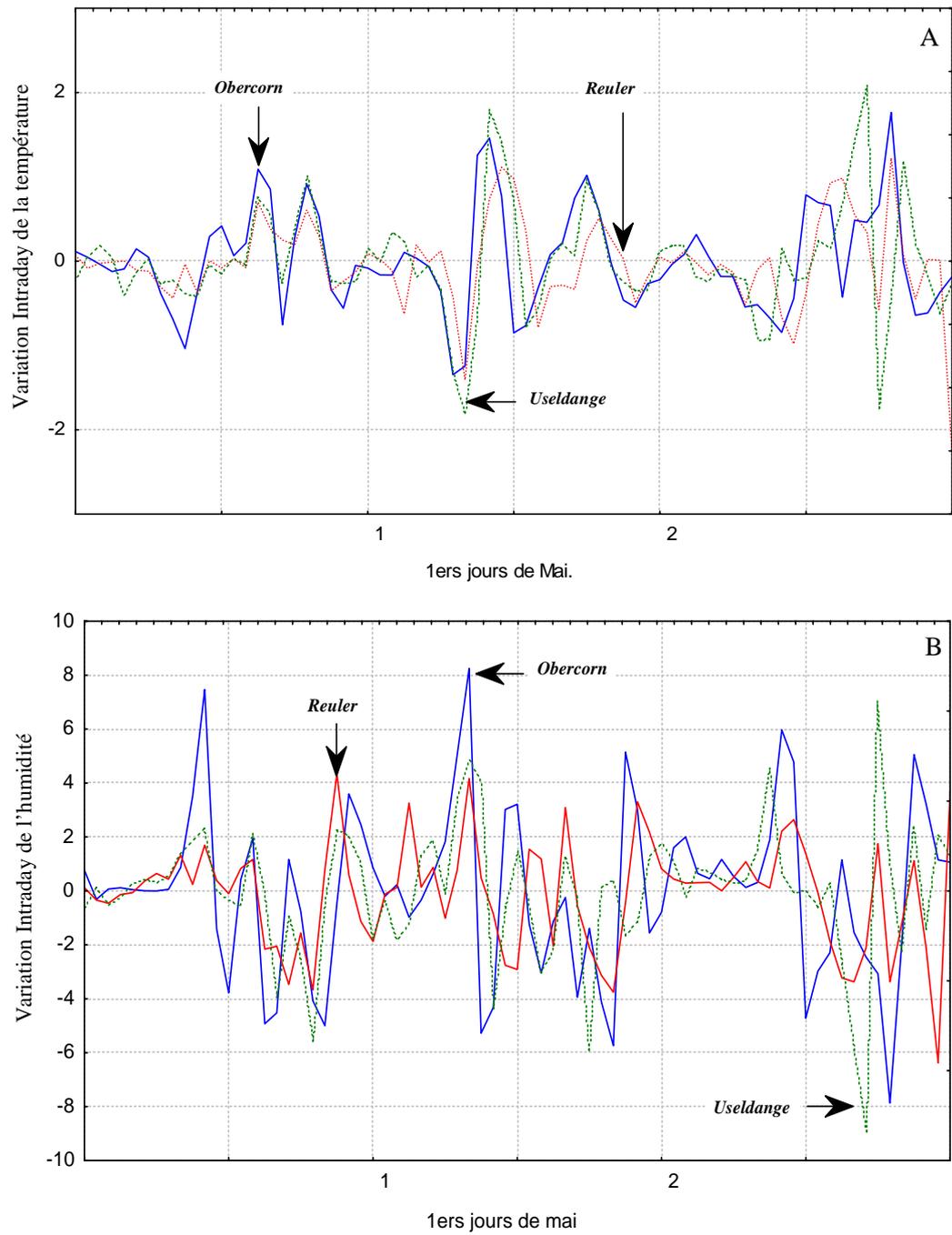
Cependant, la méthode basée sur la transformation de Fourier est indispensable dans l'épidémiologie des parasites cryptogamiques affectant la culture du blé d'hiver. En effet, la variation intraday permet de visualiser les grandes fluctuations d'un paramètre météorologique qui sont enregistrées à l'intérieur de la journée. Pour installer un réseau de stations météorologiques au Grand-Duché de Luxembourg dans un but d'avertissement, il est important d'utiliser la méthodologie développée ci-dessus et de procéder comme suit : a) fixer une station météorologique dans une zone géographique déterminée et des stations mobiles à des points plus ou moins éloignés autour de cette station fixe ; b) établir des comparaisons entre la station fixe et chaque station mobile en se basant sur les différentes décompositions des données météorologiques originales ainsi que les conditions contrôlées ; c) déterminer la distance que peut couvrir la station météorologique fixe en analysant les amplitudes intraday des principaux paramètres de cette station fixe par rapport à chaque station mobile ainsi que les conditions contrôlées. En déterminant la distance que peut couvrir une station météorologique fixe, il sera possible de connaître le nombre de stations météorologiques pour chaque région

céréalière luxembourgeoise et d'automatiser les cartes de risque d'infection pour l'ensemble des régions céréalières du Grand-Duché de Luxembourg.

Cette méthode permet aussi de déceler les fluctuations d'un paramètre à différents niveaux topographiques. Ceci permet de comprendre et d'expliquer la variation d'une maladie entre un plateau et un bas fonds ou entre deux versants Nord et sud ou une pente. L'utilisation de cette méthode permet de donner les différents gradients de la température et de l'humidité entre chaque niveau topographique. Ceci renforcera les explications concernant certaines maladies à effet régional telles que les rouilles qui dépendent beaucoup de la variation de la température et de l'humidité relative. L'étude réalisée en 2001 sur les stations horaires de l'ASTA montre cette variation (figure 2-6-8, A et B). Des écarts de températures s'observent entre les trois stations météorologiques de l'ASTA à savoir Reuler qui se trouve dans l'Oesling, Useldange au Nord-ouest du Gutland et Obercorn au Sud-ouest du Gutland. Les écarts de températures s'expliquent par les inégalités du relief, l'altitude moyenne de l'Oesling est de 450 m environ, celle du Gutland atteint à peine 250 m. Au niveau du Gutland, des microclimats existent au niveau de chaque station. Des microclimats locaux sont localisés au Sud-ouest (Obercorn) et au Nord-est du Gutland (Useldange). Concernant l'humidité relative, cette analyse met en évidence une grande variation entre les trois stations de l'ASTA. En effet, Reuler est caractérisé par une forte humidité et Useldange (se situe à la limite entre le Gutland et l'Oesling) se caractérise par une tendance de l'humidité qui fluctue entre celle du Gutland et celle de l'Oesling. Obercorn se caractérise par une tendance journalière très différente de celle des deux autres stations. Pour la pluie, les grandes fluctuations intraday enregistrées entre Everlange et Reuland en 2000 s'expliquent par les deux épisodes stratiformes et convectifs. Sur une période de 24 heures, la pluie est souvent enregistrée dans les deux sites mais à l'intérieur de la journée, la dispersion est beaucoup plus grande. Il pleut dans un site et il faut attendre un laps de temps pour qu'il pleuve dans l'autre et vice-versa.

L'analyse du nombre d'heures favorables à la septoriose (conditions contrôlées) révèle une différence nettement remarquable des périodes d'infections entre Everlange et Reuland. Ceci montre l'existence d'un décalage pour les périodes d'infections entre les deux sites. Ce décalage est surtout dû au paramètre "pluie" dont la corrélation entre les deux sites est très faible ( $r = 0.27$ ). Mais cet écart s'explique en grande partie par le type de pluie, sa persistance et sa dispersion dans l'espace et dans le temps, surtout pendant la phase montaison du blé où les épisodes convectifs sont très importants.

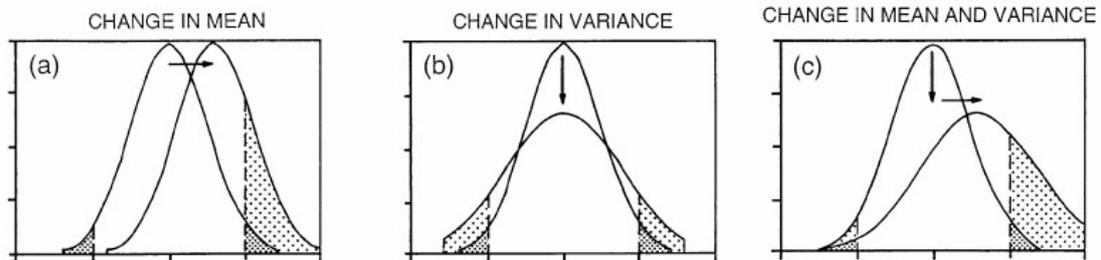
L'étude de corrélation entre les conditions contrôlées et les différentes variations (Intraday, Diurnal, Synoptic et Seasonal) de température, humidité relative et pluie à Reuland en 2000 (tableau 2-6-2) montre un très faible ajustement entre les différents paramètres testés. Ceci paraît logique du fait que l'analyse se base sur des paramètres n'ayant pas la même fenêtre et le même filtre de calcul. Ainsi, par exemple, la corrélation entre la variation Intraday et Diurnal est mieux que la relation existante entre Intraday et Synoptique ou encore entre Intraday et Seasonal. Cette différence est due au type de lissage qui varie d'une série à l'autre. Plus le filtre est grand, plus le lissage est fort, plus sigma est élevé (figure 2-6-9 A, B et C). Cette dernière idée a été vérifiée en calculant, pour chaque site, le rapport de la variance de chaque variation par rapport à la variance totale.



**Figure 2-6- 8 : Variation Intraday de la température (A) et de l'humidité (B) dans trois stations météorologiques de l'ASTA pendant les premiers jours de mai 2001.**

**Tableau 2-6- 2 : Corrélation pour Reuland entre température, humidité relative, pluie calculée dans les conditions de la septoriose et humidité relative, température, pluie calculées pour chaque série (Intraday, Diurnal, synoptic et seasonal).**

	Température contrôlée	Humidité contrôlée	Pluie contrôlée	Température			
				Intraday	Diurnal	Synoptic	Seasonal
Température contrôlée	1						
Humidité contrôlée	0.09	1					
Pluie contrôlée	0.05	0.12	1				
Température Intraday	0.02	-0.006	0.009	1			
Température Diurnal	0.04	0.007	0.03	0.5	1		
Température Synoptic	0.03	-0.09	0.08	0.08	0.23	1	
Température Seasonal	0.3	-0.48	-0.04	0.0001	0.0005	0.07	1
	Température contrôlée	Humidité contrôlée	Pluie contrôlée	Humidité			
				Intraday	Diurnal	Synoptic	Seasonal
Température contrôlée	1						
Humidité contrôlée	0.09	1.					
Pluie contrôlée	0.047	0.12	1				
Température Intraday	-0.01	0.01	0.04	1			
Température Diurnal	-0.13	0.01	0.06	0.5	1		
Température Synoptic	0.26	0.48	0.14	0.08	0.29	1	
Température Seasonal	-0.19	0.6	0.08	6.4e-005	0.0005	0.1	1
	Température contrôlée	Humidité contrôlée	Pluie contrôlée	Pluie			
				Intraday	Diurnal	Synoptic	Seasonal
Température contrôlée	1						
Humidité contrôlée	0.09	1					
Pluie contrôlée	0.047	0.12	1				
Température Intraday	0.009	0.003	0.1	1			
Température Diurnal	0.002	0.02	0.4	0.3	1		
Température Synoptic	0.1	0.19	0.5	0.01	0.24	1	
Température Seasonal	0.1	0.12	0.2	7.7e-006	0.0003	0.1	1



**Figure 2-6- 9 : Distribution de la variance en fonction de la moyenne (MEEHL *et al.*, 2000).**

Les résultats de ce calcul sont les suivants :

**Reuland**

$$\begin{aligned}
 (\text{stdc}(t_{\text{Seasonal}}))^2 &= A \\
 (\text{stdc}(t_{\text{Synoptic}}))^2 &= B \\
 (\text{stdc}(t_{\text{Diurnal}}))^2 &= C \\
 (\text{stdc}(t_{\text{Intraday}}))^2 &= D \\
 A / (A + B + C + D) &= 0.713 \\
 B / (A + B + C + D) &= 0.1695 \\
 C / (A + B + C + D) &= 0.01 \\
 D / (A + B + C + D) &= 0.005
 \end{aligned}$$

**Everlange**

$$\begin{aligned}
 (\text{stdc}(t_{\text{Seasonal}}))^2 &= A \\
 (\text{stdc}(t_{\text{Synoptic}}))^2 &= B \\
 (\text{stdc}(t_{\text{Diurnal}}))^2 &= C \\
 (\text{stdc}(t_{\text{Intraday}}))^2 &= D \\
 A / (A + B + C + D) &= 0.764 \\
 B / (A + B + C + D) &= 0.171 \\
 C / (A + B + C + D) &= 0.061 \\
 D / (A + B + C + D) &= 0.003
 \end{aligned}$$

Stdc = standard déviation.

La variance de A constitue 71.3 % à Reuland et 76.4 % à Everlange de la variance totale alors que la variance Intraday ne constitue que 0.5 % à Reuland et 0.3 % à Everlange de la variance totale. Ces résultats montrent que plus le filtre est grand, plus la variance est

grande. Cette méthode est très intéressante pour superposer la variation des maladies cryptogamiques en fonction de chaque gradient de température et d'humidité relative. Ainsi, en présence de l'inoculum d'un parasite cryptogamique, il est possible de déceler les fluctuations nocturnes et diurnes à chaque niveau topographique et de présenter une carte de risque pour ces champignons. Dans le futur, il sera important d'automatiser cette analyse et de l'intégrer dans un programme qui permettra de générer des cartes de risques d'infections pour l'ensemble du territoire luxembourgeois.

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

2-6- 1 : Matrice de corrélation de la température, de l'humidité relative et la pluie entre Everlange et Reuland en 2000 pour les différentes variations (horaire, intraday, diurnal, synoptique et seasonal) .....	VI-10
2-6- 2 : Corrélation pour Reuland entre température, humidité relative, pluie calculée dans les conditions de la septoriose et humidité relative, température, pluie calculées pour chaque série (Intraday, Diurnal, synoptique et seasonal).....	VI-16

## FIGURES

2-6- 1 : Schéma représentant la variation de filtres en fonction de différentes périodes.....	VI-3
2-6- 2 : Schéma des différentes variations météorologiques. ....	VI-4
2-6- 3 : Méthodologie de détermination des différentes variations. A : Calcul de la variation intraday et diurnal ; B : Représentation de la variation intraday et diurnal ; C : Calcul de la variation synoptique et seasonal (station d'Useldange entre 6 avril 2001 et 5 février 2002).....	VI-6
2-6- 4 : Corrélation entre Everlange et Reuland en 2000 pour trois paramètres météorologiques horaires (humidité relative en %, température en °C et pluie en mm).....	VI-9
2-6- 5 : Différentes variations de la température et de l'humidité à Everlange et Reuland en 2000. A : Variation Intraday ; B : Variation Diurnal ; C : Variation Synoptique; D : Variation Seasonal. Légende : tc = température contrôlée ; Rhc = humidité relative contrôlée.....	VI-11
2-6- 6 : Variation du coefficient de corrélation entre Everlange et Reuland pour les deux variations Intraday et Diurnal en fonction du temps en 2000. Le coefficient de corrélation a été calculé sur des données horaires sur une période de 15 jours.....	VI-12
2-6- 7 : Périodogramme de la variation de la température horaire à Useldange.....	VI-13
2-6- 8 : Variation Intraday de la température (A) et de l'humidité (B) dans trois stations météorologiques de l'ASTA pendant les premiers jours de mai 2001.....	VI-15
2-6- 9 : Distribution de la variance en fonction de la moyenne (MEEHL <i>et al.</i> , 2000).....	VI-16

## REFERENCES

FAY, G. (2000). Théorèmes limites pour les fonctionnelles du périodogramme. Traitement du Signal et des Images. Thèse de doctorat. Paris. France, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications ENST.

HORNE, J. H. & S. L. BALIUNAS (1986). "A prescription for period analysis of unevenly sampled time series." Astrophys.J. **302**: pp. 757-763.

LOMB, N. R. (1976). "Least-squares frequency analysis of unequally spaced data." Astrophys Space Sci. **39**: 447-462.

NICOLAS, J. (2003). Analyse du signal. Note de cours Statistiques & Mathématiques en Surveillance de l'Environnement. Fondation Universitaire Luxembourgeoise. Arlon. Belgique.

**CONCLUSION GÉNÉRALE**  
et  
**PERSPECTIVES**

# ANNEXES

Les annexes sont compilées dans le cd-rom ci-joint.

Elles comprennent :

- **Annexe 1** : Logiciel des échelles de sévérité des maladies des feuilles.
- **Annexe 2** : Programme et résultats des filtres de décompositions des séries chronologiques.
- **Annexe 3** : Simulations non inclus dans la thèse.
- **Annexe 4** : Colloques.

---

## DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

### Cadre de l'étude

Cette thèse intitulée : « Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision » s'inscrit à l'interface des disciplines d'agrométéorologie et de pathologie végétale. Elle voudrait contribuer à améliorer la compréhension des relations qui existent entre le peuplement végétal du blé d'hiver et le complexe parasitaire foliaire affectant cette culture au Grand-Duché de Luxembourg.

L'objectif de cette thèse est de participer à l'élaboration et à la mise en place d'un système d'avertissement du complexe « blé d'hiver - principal complexe parasitaire foliaire au Grand-Duché de Luxembourg- climat » et d'aider ainsi l'agriculteur luxembourgeois à mieux gérer sa culture. Le but de ce système est d'assurer une rentabilité économique par la réduction de charges inutiles et une diminution des impacts environnementaux par l'anéantissement des effets liés à la résistance des souches de parasite.

La conception d'un tel système nécessite l'élaboration et le couplage des modèles de formation des feuilles et d'épidémiologie des principales maladies cryptogamiques affectant ces feuilles au Grand-Duché de Luxembourg.

Au commencement de ce travail, aucun modèle concernant les maladies cryptogamiques n'existait et aucun suivi des maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver n'avait été préalablement établi au Grand-Duché de Luxembourg. Par conséquent, un certain nombre d'hypothèses ont été formulées pour résoudre cette problématique liée à la gestion de la culture du blé d'hiver. Pour rappel, parmi les principales hypothèses qui ont été formulées, nous citons : a) la septoriose est la principale maladie affectant la culture du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg ; b) la variété est un élément déterminant dans la simulation de la maladie et la croissance de la plante ; c) l'interaction de certaines pratiques agricoles (fumure azotée, choix variétal, ...) avec le microclimat favorise l'effet régional de certaines maladies ; d) l'application d'au moins deux traitements fongicides à des stades de croissance différents n'est que rarement rentable financièrement.

Pour répondre à ces hypothèses, des essais avec un mélange de variétés ont été installés au Grand-Duché de Luxembourg entre 1999 et 2003 en collaboration avec le Lycée Technique Agricole dans des sites à caractéristiques météorologiques différentes. Pour chaque variété testée, des comparaisons ont été établies d'une part entre un double traitement fongicide (GS32+GS59) et un seul traitement réalisé entre GS32 et GS59 et d'autre part, entre les parcelles témoins et celles traitées.

Ensuite, pour vérifier les hypothèses de départ, nous avons subdivisé notre travail en deux grandes parties :

- La première concerne l'épidémiologie de chaque champignon foliaire qui a été observée. Dans cette partie, nous avons analysé le comportement variétal vis-à-vis de chaque maladie ainsi que l'effet des traitements fongicides qui ont été appliqués ;
- La deuxième partie concerne la simulation des principales maladies foliaires et la croissance des trois dernières feuilles (F3, F2 et F1) en fonction de deux types de variétés (hâtive et tardive) et de la date de semis en se basant sur le phyllotherme. L'étude de simulation de chaque maladie comprend la calibration, la validation et la mise en application des résultats de cette simulation.

Pour l'élaboration du modèle épidémiologique du complexe foliaire, la recherche bibliographique a permis d'estimer que l'effet du climat sur les épidémies de la septoriose et de la rouille jaune avait déjà été largement étudié. En revanche, les effets de l'hôte sur le développement des maladies n'avaient été que très peu explorés. En outre, aucune étude épidémiologique concernant les maladies cryptogamiques foliaires du blé d'hiver n'avait été effectuée au Grand-Duché de Luxembourg.

Enfin, dans une optique d'adapter un modèle de prévision permettant le couplage entre la croissance des feuilles et les périodes d'infection, il nous a fallu analyser les composantes micrométéorologiques qui favorisent le développement de ces parasites foliaires au Grand-Duché de Luxembourg et les limites de chacune de ces composantes dans le cycle épidémique de ces maladies.

## Synthèse des résultats sur la septoriose des feuilles

### Epidémiologie de la septoriose

La septoriose des feuilles causée par la forme conidienne *Septoria tritici* [ROBBINS & DESMAZIÈRES] téléomorphe *Mycosphaerella graminicola* [FUCKEL, SCHROETER] est la principale maladie foliaire affectant la culture du blé d'hiver au Grand-duché du Luxembourg. Cette maladie peut causer une perte de rendement entre 20 et 30 % (partie I, chapitre III) pour les années à forte septoriose si la dernière feuille est sévèrement attaquée ( $r^2=0.6$ ,  $P < 0.05$ ). En effet, l'état sanitaire de F1 a beaucoup influencé la définition du rendement final. Les feuilles F2 et F3 ont moins influencé le rendement final par rapport à F1 mais agissent indirectement sur l'état sanitaire de ce dernier étage (partie I, chapitre VII). La variation de la maladie a été très hautement significative ( $P < 0.001$ ) entre une variété sensible (Bussard) et une variété résistante (Dream). Il existe une différence significative ( $P < 0.001$ ) du pourcentage de la septoriose observé pour une même variété semée dans deux sites à caractéristiques climatiques différentes (partie I, chapitre VII, III.1.). En effet, en plus des variétés, la variation des conditions météorologiques d'un site à l'autre joue un rôle très important dans la différence de la maladie. Ceci révèle l'importance de l'échelle parcellaire pour caractériser cette interaction. Le taux le plus faible de la maladie a été enregistré dans la Moselle.

Concernant, l'effet des différents traitements fongicides appliqués, notre étude a révélé une grande différence entre une variété résistante (Dream) et une variété susceptible (Bussard) ainsi qu'entre une année à forte maladie et une année à faible maladie. En effet, l'efficacité des deux traitements par rapport à un seul traitement n'a été distinguée qu'au niveau des F2 et F3 des variétés susceptibles. Pour les variétés résistantes, aucune

différence significative n'a été observée entre deux traitements et un seul traitement (partie I, chapitre VII, III.2.).

L'analyse de la rentabilité économique de chaque traitement a montré que le double traitement fongicide n'a pas permis de récupérer les frais de la production pour les variétés sensibles. Pour les variétés résistantes, le rendement financier des parcelles traitées ne diffère pas significativement par rapport au témoin. Généralement, un traitement bien ciblé (en fonction de l'intensité de la maladie sur la F4 et la F3) est plus rentable qu'un double traitement. Ainsi, en 2002, l'analyse du rendement financier a montré que le traitement réalisé entre les stades GS37 et GS39 a assuré un gain de plus de 80 Euro/ha pour seulement 20 Euro/ha pour le traitement épiaison. En outre, les deux traitements n'ont même pas permis de compenser les dépenses de l'achat des intrants. En 2003, le meilleur rendement net et financier (en €) a été assuré par le traitement réalisé au stade GS41. Ce traitement dépasse largement les autres traitements surtout GS32+GS59. Les traitements qui ont été réalisés au stade GS59, GS37 et les deux demi doses apportées au stade GS37 (Sphère 0.5 l/ha) et GS59 (Horizon 0.5 l/ha) ont abouti aussi à un gain de rendement. Les meilleurs rendements ont été obtenus à des stades où la F3 ne dépasse pas 5 % de septoriose et F4 ne dépasse pas 10 % (partie I, chapitre VII, III.2.).

Il existe une relation directe entre le niveau de septoriose, la chute de la surface verte enregistrée sur les trois dernières feuilles pendant la maturité laiteuse et la perte de rendement (cf. figure 1-3-21, partie I, chapitre III).

Le comportement variétal est très important dans l'épidémiologie de la septoriose. Deux variétés qui ont le même comportement pour les feuilles de base peuvent changer de comportement pour les deux dernières feuilles émergées. Ce dernier cas a été observé pour Bussard et Flair en 2000 et 2001 où le taux de maladie enregistré sur la F5 et la F4 était équivalent pour les deux variétés mais à partir de la F3, ce taux a été plus faible sur Flair.

### Simulation de la septoriose

De nombreux modèles de simulation de la septoriose avaient déjà été conçus dans les pays limitrophes du Grand-Duché de Luxembourg tels que Proplant en Allemagne, Epiprè aux Pays-Bas, Persept en France et Proculture en Belgique. Notre choix s'est fixé sur le modèle Proculture développé par l'Unité de Phytopathologie de l'Université catholique de Louvain-la-Neuve sous la direction du Professeur H. MARAITE. Proculture se démarque des systèmes d'avertissement classiques par sa capacité de coupler la formation des feuilles et la période de latence. Notre tâche a été de calibrer ce modèle en fonction des caractéristiques climatiques de chaque région étudiée et de développer ses performances en fonction de deux types de variétés sensible et résistante (partie II, chapitre II). Cette dernière tâche n'a jamais été développée au sein de Proculture. Les études réalisées avec ce logiciel sont de deux types : a) une étude qualitative qui consistait à valider les périodes d'infection simulées par le modèle par rapport aux variations de maladie enregistrées sur les sites d'essai ; b) une étude quantitative qui consistait à valider les pourcentages de la surface foliaire malade enregistrés dans les sites d'essai par rapport à ceux simulés par Proculture pour deux types de variétés (sensible et résistante). Ce système a été continuellement amélioré grâce aux résultats de chaque saison. Des particularités propres à ce pays ont été mises en évidence : variétés différentes de celles des régions céréalières belges, un ensemble de

---

microclimats qui favorisent le développement régional de certaines maladies telles que la rouille brune (partie I, chapitre VI et partie II, chapitre V) et l'oïdium (partie I, chapitre IV).

Ainsi, les trois années de validation de Proculture au Grand-Duché de Luxembourg (2000 à 2002) ont révélé que les sorties du modèle pourraient être utilisées pour prédire les infections primaires et secondaires exprimées ou en incubation à condition de pouvoir accroître la précision concernant le recalage phénologique. Le succès du modèle dépasse 90 % à Everlange et atteint 96 à 98 % à Reuland pour les variétés sensibles (Bussard) et les variétés résistantes (Dream). Pour la validation quantitative, un grand succès du modèle a été enregistré pour les variétés sensibles entre 2000 et 2002 (partie II, chapitre II, III.2). Ceci est très important pour définir le moment optimum de traitement. En ce qui concerne les variétés résistantes (Dream), la concordance a été très importante entre la simulation et l'observation pour les étages foliaires situés à la base. Toutefois, pour les deux derniers étages, une surestimation a été observée. La variété ne se comporte pas de la même façon entre les étages foliaires de la base et du sommet. Ainsi, il est important de retirer des simulations quantitatives de Proculture un facteur correctif correspondant à 30 % de la simulation pour la F2 et à 50 % pour la F1.

Ce logiciel permet de prévoir les latences futures sur les cinq dernières feuilles ainsi que le pourcentage de la surface malade qui sera atteint, ce qui le place au premier rang dans l'évaluation des avertissements agricoles parmi toute la panoplie des systèmes existants.

Actuellement, ce système est utilisé dans les avertissements du moment optimum dans le cadre du projet intitulé : « Conception et élaboration d'un système intégré d'avertissement des maladies cryptogamiques du blé d'hiver au Luxembourg » financé par l'ASTA et coordonné par la Cellule CREBS du CRP-GL. Les avertissements évalués via Proculture sont publiés sur la page Web de la Chambre d'Agriculture Luxembourgeoise en français et en allemand et dans la presse agricole luxembourgeoise en allemand.

Cependant, il conviendrait, dans une suite à cette recherche, de développer des modules concernant la forme téléomorphe *M. graminicola* pour expliquer des changements brutaux dans le taux de maladie exprimé ainsi que l'interaction avec les autres maladies, particulièrement la rouille brune qui a été observée sur Bussard à Everlange en 2000. De plus, il est important de prédire le taux maximum d'apparition de la maladie. Ceci permettrait de prévoir plus précisément le moment de nécrose des trois dernières feuilles. Il est intéressant aussi d'améliorer la notion de seuil d'avertissement qui est le seuil auquel l'agriculteur doit se préparer à traiter. Les données nécessaires pour établir ces seuils d'avertissement sont des données épidémiologiques et agronomiques issues d'expérimentations au champ. Des améliorations sont également possibles pour prévoir la maladie à long terme en introduisant au sein du logiciel des données météorologiques issues des centres de prévisions météorologiques. Ceci pourrait se faire par une collaboration avec les instituts météorologiques.

Enfin, la détection de la résistance des souches de *Septoria tritici* aux strobilurines en 2002 (AMAND *et al.*, 2003) impose donc d'approfondir la question de fongicide en parallèle avec la définition du moment de traitement. L'utilisation intensive des strobilurines dans la culture du blé ne fera qu'aggraver la situation. Il est donc important

de mettre au point de stratégies de combiner les produits fongicides et de définir le type de produit à appliquer pour chaque maladie.

### Simulation de la croissance des feuilles

La simulation de la croissance des feuilles réalisée en fonction de deux types de variétés (hâtive et tardive) en se basant sur la somme de degrés jours (partie II, chapitre I) a révélé que le phyllotherme diffère significativement ( $P < 0,0001$ ) entre les variétés hâtives et les variétés tardives et entre les trois dernières feuilles (F3, F2 et F1). En effet, pour les variétés hâtives, ce phyllotherme est proche de 130 degrés-jours pour les trois dernières feuilles. Cependant, une étude réalisée en 2001 sur les différentes fréquences des trois dernières feuilles émergentes des variétés hâtives et tardives (Dream) a montré que ces dernières ont un phyllotherme principal qui varie énormément entre les trois derniers étages foliaires. Ce phyllotherme correspond à 150 degrés-jours pour la F3. Il a été enregistré dans plus de 43 % des cas. Ce phyllotherme principal des variétés tardives passe de 150 degrés-jours (43 %) pour la F3 à 127 degrés-jours (68 %) pour la F2 et à 100 degrés-jours pour la F1. La formation des deux dernières feuilles de Dream nécessite une somme de moins de 227 degrés-jours alors que pour la formation de la F3, 150 degrés-jours sont requis.

En plus de cette étude, les analyses de nos observations montrent que l'émergence de la nouvelle feuille située au-dessus commence avant que celle qui la précède n'achève sa formation complète. Souvent la nouvelle feuille commence à émerger lorsque celle qui la précède atteint 80 et 90% de son développement final. Il est indispensable donc de retenir que les feuilles nouvellement formées apparaissent souvent avant que les feuilles qui les précèdent achèvent complètement leur croissance (l'intervalle de précision est de 2 à 5 jours avant que la feuille précédente ne soit formée complètement). Cette dernière idée n'a jamais été signalée dans la littérature et constitue une des originalités de ce travail.

Enfin, la simulation de la croissance des trois dernières feuilles a été réalisée sur une même variété dans un même site en fonction de trois dates de semis en se basant sur la somme de degrés-jours. Cette étude a montré que la date de semis influence le nombre de feuilles qui seront formées. Plus le semis est tardif, plus le nombre de talles sera réduit.

Il serait intéressant de développer des modules au sein de Proculture qui spécifient la croissance des feuilles pour chaque type de variétés (hâtive et tardive). En plus, il est nécessaire de prendre en compte, dans les évaluations d'avertissement, le début de formation précoce des deux dernières feuilles avant que celles qui les précèdent ne soient complètes. Finalement, il conviendrait, dans une suite à cette recherche, de réaliser des études en fonction de différentes doses de nutrition azotée et du photopériodisme qui sont deux facteurs qui agissent sur la croissance des feuilles.

## Synthèse des résultats sur la rouille jaune des feuilles

### Epidémiologie de la rouille jaune

L'épidémie de la rouille jaune du blé causée par *Puccinia striiformis* a été confirmée à Everlange et Reuland pendant trois années d'observations (1999, 2000 et 2001). En 2000, une évolution spectaculaire de la maladie a été observée à partir de l'épiaison

pour atteindre son maximum pendant la maturité laiteuse (entre GS69 et GS77). En 2001, l'évolution de la maladie était un peu tardive et le maximum a été enregistré à la fin de la maturité pâteuse pour Everlange et à la fin de la maturité laiteuse pour Reuland (partie I, chapitre V). Cette évolution est la conséquence d'une interaction de trois facteurs : a) la susceptibilité variétale ( $P < 0.001$ ) ; b) la présence de l'inoculum ; c) les facteurs météorologiques favorables à la maladie. En 2000, les traitements précoces ont été plus efficaces que ceux réalisés au stade GS59. Cependant, en 2001, tous les traitements réalisés à Everlange à partir du stade GS37 ont assuré une bonne protection des trois dernières feuilles. En revanche, le traitement réalisé au stade GS32 a permis la protection de la F3 mais n'a montré aucune efficacité pour la F1.

Concernant l'ajustement de la relation maladie-rendement, cette corrélation est très importante en 2000 entre l'AUDPC relative calculée (entre le stade GS65 et GS75) et le gain de rendement net (cf. partie I, chapitre V, figure 1-5-6). Entre la floraison et la maturité laiteuse, la maladie a atteint son évolution maximale. En 2001, la maladie était tardive et la corrélation entre le gain de rendement net et l'AUDPC relative calculée (entre GS69 et GS75) était très faible pour la F1 et la F2 et moyenne pour la F3 entre la fin de floraison et la maturité laiteuse.

### Simulation de la rouille jaune

Deux types d'études de simulation ont été réalisés pour cette maladie. La première concerne, la comparaison entre les résultats de la sensibilité du modèle de DENNIS (1988) par rapport aux données météorologiques du Grand-Duché de Luxembourg en fonction de la maladie (partie II, chapitre III). Cette étude a permis de déterminer les classes de paramètres météorologiques (température, humidité relative et précipitations journalières) favorables à la maladie. En l'hiver, ce sont les températures comprises entre 4°C et 7°C, RH > 70 % et présence de pluie qui sont propices à la maladie. Ces conditions d'humidité relative et de la pluie sont les mêmes en hiver qu'en printemps. Seulement, les températures sont comprises entre 7°C et 15°C. Enfin, pendant la croissance des feuilles ce sont les température comprises entre 7°C et 16°C, une humidité relative proche de la saturation (la corrélation est plus importante pour RH > 80 % et 90 % que pour RH > 70 %). Les températures supérieures à 16°C sont inhibitrices pour la maladie.

La deuxième étude concerne la détermination des paramètres météorologiques horaires qui ont favorisé cette maladie au Grand-Duché de Luxembourg (partie II, chapitre IV). Ainsi, notre étude de fréquences d'occurrence horaire à l'échelle de la décade nous a permis de déterminer les classes de température, d'humidité et de pluie qui ont favorisé l'épidémie de la rouille jaune. Il s'agit d'une humidité supérieure à 92% associée à une température comprise entre 4 et 16°C. La pluie est indispensable au début de l'épidémie pour son déclenchement mais elle n'est pas nécessaire dans le processus d'infection. Le rôle de la pluie est aussi déterminant dans la formation des foyers à proximité (SACHE, 2000 ; SACHE, 2002).

L'analyse des seuils de fréquence d'occurrence des différentes classes calculées par pas de temps horaire à l'échelle de la décade a révélé l'importance de prendre le seuil de 15 % de la classe dominante avec minimum 4 heures consécutives (l'humidité supérieure à 92 % et la température comprise entre 4 et 16°C). Ce seuil de 15 % se réduit à 10 % pour un minimum de 8 heures consécutives de la classe dominante (partie II, chapitre IV, tableau 2-4-4). Les occurrences statistiques calculées pour ces seuils ont fait émerger un CSI (Critical success index) de 0.85 pour minimum 4 heures

consécutives et de 0.78 pour minimum 8 heures consécutives. En plus de ce CSI très important, les FAR (False alarm ratio) ont été presque nulles pour ces seuils.

Cette étude nous a permis de proposer un modèle de simulation de la rouille jaune pour le Grand-Duché de Luxembourg. Les conditions qui doivent être réunies pour favoriser l'épidémie de la maladie sont une humidité supérieure à 92 % pendant au moins 4 heures associée à une température comprise entre 4 et 16°C pendant au moins 48 heures. La période de latence relative à l'infection journalière donnée par chaque modèle a été calculée par l'équation de ZADOKS (1961) adaptée par RAPILLY (1976). Les résultats des simulations de l'infection et de latence donnés par notre modèle sont en très bonne concordance ( $r = 0.92$ ,  $P < 0.05$ ) avec les données d'observations. Ce modèle doit être confirmé au cours des prochaines campagnes.

## Synthèse des résultats sur la rouille brune des feuilles

### Epidémiologie de la rouille brune

La rouille brune a connu un développement spectaculaire ces cinq dernières années au Grand-Duché de Luxembourg, particulièrement pendant les années 1999-2000 et 2001 à Everlange et en 2000, 2001 et 2003 dans la Moselle luxembourgeoise.

A Everlange en 2000, la maladie était très précoce, elle a déjà été détectée à l'épiaison, ce qui signifie que les traitements GS59 (Allegro 1 l/ha) et GS59+40N ont eu un effet sur les périodes survenues après l'épiaison. En 2001, la maladie était très tardive par rapport à l'année précédente dans les trois sites étudiés. Un traitement précoce, réalisé au stade GS32 (Allegro 1 l/ha) à Everlange, n'a eu aucun effet sur la protection des feuilles F1 et F2 (partie I, chapitre VI).

En 2003, tous les traitements effectués à partir du stade GS37 avec Opéra 1.5 l/ha ont assuré une bonne protection des trois dernières feuilles à Everlange et à Christnach. Aucune différence significative n'a été enregistrée entre le traitement qui a été réalisé au stade GS32 (Opéra 1.5 l/ha) et le témoin. Cependant, en Moselle, ce sont surtout les traitements tardifs, réalisés à partir du stade GS39 et les doubles traitements qui ont assuré une bonne protection des trois dernières feuilles. Une compétition pour l'occupation de la surface verte a été observée entre la rouille brune et la septoriose. La rouille brune est dominante en Moselle. L'analyse de rendement a révélé un gain significatif du traitement réalisé au stade GS39 en Moselle par rapport aux autres traitements. Or, ce site est caractérisé par une faible intensité de la septoriose et par conséquent on peut admettre que l'impact du traitement est essentiellement lié à la rouille brune.

### Simulation de la rouille brune

Cette étude concerne la détermination des conditions météorologiques nocturnes qui favorisent la germination et la pénétration dans l'hôte de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg. La détermination de la relation entre ces conditions nocturnes et la maladie n'a été jamais évoquée. Ainsi, les conditions météorologiques qui ont été à l'origine de l'évolution de la maladie sont surtout les classes de températures nocturnes comprises entre 12 et 18°C avec un optimum entre 14 et 16°C, associées à une humidité ambiante comprise entre 80 et 100 %. Les températures supérieures à 18°C et inférieures à 12°C ont été très rares pendant l'évolution de la maladie.

En effet, l'étude de la corrélation entre la maladie et le nombre d'heures avec au moins 12 heures consécutives des conditions météorologiques a fait ressortir la classe de températures comprise entre 8 et 16°C associée à une humidité supérieure à 80 % et sans pluie. Cette corrélation est positive et significative entre cette classe et le niveau de maladie enregistré sur la F1 ( $r = 0.93$  ;  $r^2 = 0.87$  ;  $P < 0.05$ ) et la F2 ( $r = 0.87$  ;  $r^2 = 0.76$  ;  $P < 0.05$ ). Au moment de l'épidémie, la fréquence des classes de températures inférieures à 8°C associées à une humidité supérieure à 60 % est très faible.

Une des perspectives qui apparaît comme un point-clé à aborder par la suite est l'influence de la structure du peuplement végétal sur le développement des épidémies. L'inversion de classement de la tolérance des variétés face aux épidémies d'une année à l'autre pourrait en effet s'expliquer par des changements de structure de ces peuplements. Pour prendre en compte ces effets, il est nécessaire d'établir les termes de passage entre la structure du couvert et le microclimat développé. Ceci serait très intéressant dans des régions luxembourgeoises comme la Moselle où le microclimat et la structure du peuplement végétal favorisent l'installation de la rouille brune.

La prise en compte des interactions entre les dommages engendrés par les parasites et le stress hydrique est également une perspective de recherche intéressante. La brumisation n'est certes pas une pratique agricole mais cela souligne que l'état hydrique des plantes joue un rôle dans l'expression de la nuisibilité (ROBERT, 2003 ; ROBERT *et al.*, 2004). L'étude de cette problématique permettrait de souligner quels sont les principaux problèmes observés (stress hydrique, qualité des récoltes) et les caractéristiques des épidémies selon les régions.

### **Synthèse des résultats sur les autres champignons foliaires observés**

L'interaction entre le microclimat local et les pratiques agricoles ont favorisé l'installation de certaines maladies telles que l'oïdium (partie I, chapitre IV) et l'helminthosporiose (partie I, chapitre VIII). L'oïdium a connu un développement très important en Moselle en 2000 sur la variété Ritmo et à Reuler en 2003 sur la variété Bussard. En Moselle, en 2000, la différence des éléments minéraux importants dans la croissance du blé ( $P_2O_5$  et Nmin) entre deux blocs du même champ a été à l'origine d'une différence très hautement significative ( $P < 0.001$ ) de la maladie entre les deux blocs. A Reuler, en 2003, l'interaction entre des températures et une humidité relative propices au champignon d'une part et d'autre part les pratiques culturales (l'apport de la fumure azotée a été de 213 kg d'azote minéral) a favorisé l'évolution de la maladie qui a atteint son maximum entre l'épiaison et la maturité. Les traitements appliqués avant le stade GS59 ont été très efficaces économiquement par rapport aux autres traitements. Cependant, aucune des gammes de fongicides (Sphère 1 l/ha ; Opéra 1.5 l/ha ; Horizon 1 l/ha) n'était efficace à 100%. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer la meilleure dose et le mélange le plus efficace pour une bonne protection de la plante.

Concernant l'helminthosporiose, cette maladie a connu un développement très important à Everlange entre 1999 et 2001. En 2000, l'évolution de la maladie était très remarquable pendant la maturité (GS77). Le pourcentage de maladie enregistré à ce stade sur les trois dernières feuilles de Bussard diffère significativement des autres variétés testées. L'effet du traitement était très visible au stade GS77 sur la F1 de Bussard, mais ce traitement n'a plus montré aucun effet 40 jours (GS89) après la dernière application. Le niveau de maladie sur la F1 et la F2 entre les stades GS71 et GS77 a eu un effet sur le rendement des variétés sensibles comme Bussard. En effet,

une relation négative se distingue nettement entre l'AUDPC de la F1 ( $r = - 0.92$  ;  $P < 0.001$ ) et le gain de rendement en qx/ha et, dans une moindre mesure, entre l'AUDPC de la F2 ( $r = - 0.79$  ;  $P < 0.05$ ) et le gain de rendement. L'interaction entre les pratiques agricoles (semis sans labour, variété sensible) et les conditions météorologiques favorables sont à l'origine de l'évolution de la maladie à Everlange. En effet, notre étude a révélé que l'évolution importante de la maladie qui a été enregistrée en 2000 à Everlange est la conséquence d'une interaction entre un semis sans labour, une variété sensible (Bussard) et les conditions météorologiques suivantes : a) humidité relative  $>70$  % pendant au moins 24 h dont au moins 6 h avec une humidité relative supérieure à 90 % pour éviter les précipitations liées à l'interruption des périodes d'infection; b) un optimum de température entre 8 et 16°C ; c) la présence de la pluie pendant au moins une heure au début de la période.

### **Proposition d'un système d'avertissement pour la culture du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg**

Le succès des simulations de Proculture pour la septoriose au Grand-Duché de Luxembourg est indiscutable. Cependant, des améliorations devraient être apportées pour perfectionner d'une part, le module de croissance et d'autre part, l'aspect variétal. De plus, ce système ne prend pas en considération les autres maladies foliaires telles que les deux rouilles (jaune et brune), l'oïdium et l'helminthosporiose. Or, ces maladies prennent une importance variable selon le microclimat local, les pratiques agricoles, le choix variétal et la présence de l'inoculum. Notre étude a simulé les différents paramètres météorologiques qui favorisent les maladies citées ci-dessus et a proposé des modèles de simulation pour ces maladies. Pour rendre opérationnels les avis de Proculture pour toutes les maladies, il est important d'intégrer au sein de ce système soit des modules relatifs à chaque maladie de manière à formuler une prévision pour l'ensemble des maladies, soit des modules externes à Proculture pour chacune des maladies mais dont le message final serait pris en compte dans l'évaluation d'avertissement en même temps que celui généré par Proculture.

Pour une diffusion plus large des avis Proculture ainsi que les simulations relatives à chaque maladie, il est important de définir spatialement les paramètres météorologiques et de prendre en considération la topographie afin d'automatiser les cartes de risque d'infection. Notre étude basée sur la transformation de Fourier (partie II, chapitre VI) a permis de décomposer les données météorologiques en un ensemble de variations (Intraday, Diurnal, Synoptic et Seasonal). La variation Intraday nous a permis de déceler les fluctuations de chaque paramètre étudié à l'intérieur de la journée. Ceci permet de déterminer les écarts de chaque paramètre analysé pour chaque zone topographique. Ainsi, avec cette méthode, il est possible de définir par rapport à un point de repère, les différentes fluctuations d'un paramètre météorologique (grande, faible ou nulle). Pour approfondir ce concept, il est important d'étudier la relation entre le niveau de maladie enregistré et les conditions topoclimatologiques.

### **Conclusion et perspectives**

La synthèse des résultats permet de mettre en valeur la complexité du système « hôte-parasite-climat ». Les acteurs de ce système et leurs interactions sont en effet multiples. Ceci explique la complexité de notre problématique qui consistait à procéder par

---

différentes étapes pour la résoudre. Aux termes de cette thèse, il est possible de répondre aux hypothèses formulées lors de l'introduction générale :

1. La septoriose a été observée chaque année entre 1999 et 2003 dans tous les essais à des degrés variables selon les conditions météorologiques et selon la variété. Une relation directe a été observée entre la variation de la maladie sur la F1 à la maturité et la variation du rendement final. Les parcelles témoins ont eu une perte de 20 à 30 % par rapport aux parcelles traitées du rendement net en 2002 et 2003 à Everlange (principale région céréalière). La rouille brune a été observée en fin de saison avec de très faibles intensités en 2002 et 2003 à Everlange et par conséquent, l'impact du traitement est essentiellement lié à la septoriose. La septoriose causée par *Septoria tritici* est la plus importante maladie qui affecte les feuilles du blé d'hiver dans les principales régions céréalières du Grand-Duché de Luxembourg. Ce qui confirme la première hypothèse formulée lors de l'introduction générale de cette thèse ;
2. Les températures nocturnes comprises entre 8°C et 16°C associées à des humidités relatives supérieures à 70 % favorisent la germination de la rouille brune au Grand-Duché de Luxembourg. En 2003, ces conditions ont été atteintes en Moselle dès le stade GS39 et les premières pustules ont été observées dès le début d'épiaison. La rouille brune a été spectaculaire en Moselle au stade maturité alors qu'elle a été très négligeable dans les autres sites. Ceci confirme que le microclimat local favorise l'effet régional de certaines maladies telles que la rouille brune (hypothèse 2) ;
3. Les études réalisées sur les deux rouilles (brune et jaune) et la septoriose ont révélé des exigences pour l'infection en terme de température, d'humidité relative et de la présence de l'eau liquide spécifiques à chaque champignon (hypothèse 3). La rouille jaune est très sensible à la température et aux variations de l'humidité relative. Les températures supérieures à 16°C sont inhibitrices pour ce champignon. Cependant, pour la rouille brune la plage thermique favorable à l'infection est plus grande que la rouille jaune ce qui peut expliquer la prédominance de l'un par rapport à l'autre suivant les régions. Pour l'eau liquide, les exigences pour l'infection sont spécifiques entre les parasites. Entre la septoriose et la rouille jaune, l'intensité des précipitations agit différemment sur la dispersion des spores. Les fortes pluies favorisent la dispersion des spores par le phénomène d'éclaboussures au sommet de la plante dans le cas de *Septoria tritici*. Cependant, cette forte pluie à une contribution globale négative au développement des épidémies de la rouille jaune (CHESTER, 1946). Le lessivage des spores est total en cas de pluie de forte intensité (SACHE, 2002) ;
4. La simulation de la croissance des feuilles en fonction de la somme de degrés jours (partie II, chapitre I) a montré une différence significative du phyllotherme (hypothèse 4) entre la variété Bussard (hâtive) et Dream (tardive). La F3 de Dream nécessite une somme de 150 degrés jours alors la F3 de Bussard nécessite un phyllotherme principal de 130 degrés jours ;
5. Le phyllotherme principal de la variété tardive Dream a passé en 2001 de 150 degrés jours pour la F3 à 127 degrés jours pour la F2 et 100 degrés jours pour la F1. Cette différence de phyllotherme entre les feuilles de la base et du sommet de la tige (hypothèse 5) s'observe plus pour les variétés tardives que pour les variétés hâtives ;
6. L'interaction entre le microclimat (humidité ambiante au sein de la couverture végétale), la susceptibilité variétal et certaines pratiques agricoles (fumure

azotée, ...) a été à l'origine du développement de l'oïdium (hypothèse 6) en Moselle en 2000 et à Reuler en 2003 (partie I, chapitre VII) ;

7. Les essais réalisés au Grand-Duché de Luxembourg entre 1999 et 2003 n'ont révélé aucun avantage financier du double traitement par rapport au traitement unique bien ciblé même dans le cas de variétés susceptibles telle que Bussard. Pour les variétés résistantes telles que Dream, l'analyse du rendement financier en 2001 indique qu'aucun traitement testé n'a pu compenser les dépenses de l'achat des intrants. Entre 1999 et 2003, la probabilité pour qu'un traitement soit plus rentable par rapport au traitement unique est très faible voir nulle même pour les variétés susceptibles (hypothèse 7).

Au-delà des connaissances acquises et de leur exploitation par la modélisation, 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 - malade ».

Dans notre étude, nous n'avons pas analysé les simulations des périodes d'infections engendrées par la forme téléomorphe *Mycosphaerella graminicola*. Les simulations concernant cette maladie ont été très peu explorées dans la littérature. L'étude de ce champignon permettrait une meilleure gestion de la culture du blé d'hiver.

D'autres perspectives envisageables concernent l'analyse et la formalisation de la perturbation des flux de carbone et d'azote dans la plante malade pour aboutir à une estimation de la nuisibilité en termes de baisses de rendement et de qualité. Pour cela, la distribution spatiale des maladies devra être reliée à la perturbation des redistributions de carbone et d'azote entre les différents organes de la plante.

Le système Proculture ne permet pas d'estimer les dommages futurs engendrés par l'interaction d'un complexe parasitaire. Ces études constituent une perspective de recherche intéressante.

Enfin, une perspective essentielle de ce travail est l'introduction des fonctions de dommage en fonction du système « hôte- complexe parasitaire- climat ». En effet, les interactions entre les agents pathogènes peuvent influencer non seulement le développement des épidémies mais également les fonctions de dommages. Le complexe parasitaire induit une perte de rendement inférieure à la somme des pertes calculées à partir des fonctions de dommage des parasites pris isolément (JOHNSON, 1992). Ce type d'interaction serait lié à la compétition entre les populations de pathogènes ou encore à une plus forte stimulation des défenses de l'hôte (SAVARY & ZADOKS, 1992; SAVARY & WILLOCQUET, 2000). Quantifier les interactions entre les agents pathogènes devrait donc permettre d'améliorer la modélisation des épidémies et l'estimation des pertes de rendement. Pour la gestion du blé d'hiver, l'étude des interactions peut se révéler importante car le profit espéré par le contrôle d'un agent pathogène peut dépendre fortement du niveau des autres parasites (SAVARY & WILLOCQUET, 2000). Considérer les interactions entre les agents pathogènes peut même parfois remettre en cause certaines décisions qui ont été raisonnées pour les parasites pris isolément (PINNSCHMIDT *et al.*, 1995).

## REFERENCES

- AMAND, D., F. CALAY, L. COQUILLART, T. LEGAT, B. BODSON, J.-M. MOREAU & H. MARAITE (2003). "First detection of resistance to Qol fungicides in *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat in Belgium." Comm. Appl. Biol. Sci. **68 (46) i**: 519-532.
- CHESTER, K. S. (1946). The nature and prevention of the cereal rusts as exemplified in the leaf rust of wheat. Annales Cryptogamici et Phytopathologici. The Chronica Botanica Company. Waltham (EU). **4**.
- DENNIS, J. I. (1988). "Temperature and wet-period conditions for infection by *Puccinia striiformis* F.sp. *tritici* race 104E137A+." Trans.Br.Mycol.Soc. **1**: 91-96.
- JOHNSON, K. B. (1992). "Evaluation of a mechanistic model that describes potato crop losses caused by multiple pests." Phytopathology **82**: 363-369.
- PINNSCHMIDT, H. O., W. D. BATCHELOR & P. S. TENG (1995). "Simulation of multiple species pest damage in rice using CERES-rice." Agricultural Systems **48**: 193-222.
- RAPILLY, F. & E. JOLIVET (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.
- ROBERT, C. (2003). Etude et modélisation du fonctionnement d'un couvert de blé attaqué par le complexe parasitaire *Puccinia tritica* - *Mycosphaerella graminicola*. Thèse de doctorat. INRA, Paris-Grignon, 137 p.
- ROBERT, C., M. O. BANCAL, P. NICOLAS, C. LANNOU & B. NEY (2004). "Analysis and modelling of effects of leaf rust and *Septoria tritici* blotch on wheat growth." Journal of Experimental Botany **55, N° .399**: 1-16.
- SACHE, I. (2000). "Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain." Agronomie **20**: 757-767.
- SACHE, I. (2002). L'épidémiologie végétale : un avenir incertain pour une discipline ancienne ? Diplôme d'habilitation à diriger les recherches. Université Paris-Sud, 44 p.
- SAVARY, S. & J. C. ZADOKS (1992). Analysis of crop loss in the multiple pathosystem groundnut-rust-late leaf spot. Plant responses to foliar attack. e. P. G. Ayres. Lancaster. 85-101.
- SAVARY, S. & L. WILLOCQUET (2000). "Rice pest constraints in tropical Asia : quantification of yield losses due to rice pests in a range of production situations." Plant disease **84**: (357-369).
- ZADOKS, J. C. (1961). "Yellow rust on wheat : studies in epidemiology and physiologic specialisation." Tijdschr.Planteziekten **67**: 69-256.

## RESUME

---

EL. JARROUDI M.

### Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision

---

Le développement de la lutte raisonnée repose sur une meilleure compréhension des relations entre les plantes hôtes et les agents pathogènes pour positionner un traitement fongicide. L'objectif de ce travail est de proposer un modèle d'avertissement pour les principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg. Afin de se rapprocher de la réalité au champ, nous avons réalisé des essais avec des mélanges de variétés sur des sites avec des caractéristiques climatiques et pédologiques différentes. Notre démarche a consisté tout d'abord à proposer un cadre de modélisation du système « blé-parasite-climat » qui a orienté les expérimentations réalisées.

La variété constitue un élément clé dans la conception d'un système intégré. La valeur du phyllotherme varie entre une variété hâtive et une variété tardive. Pour cette dernière, la valeur du phyllotherme varie aussi entre les feuilles situées à la base et celles situées au sommet de la tige.

Le degré de sévérité de la maladie varie aussi selon la variété (résistante ou sensible). Ce travail propose une étude de simulation entre 2000 et 2002 de la forme anamorphe de *Mycosphaerella graminicola* très connue sous le nom de *Septoria tritici*. Cette simulation se base sur le système Proculture développé par l'Unité de Phytopathologie de l'UCL. Ce système se démarque des 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. Ce système simule correctement la croissance des cinq dernières feuilles. Deux types de validations (quantitative et qualitative) ont été réalisés via ce système en fonction d'une variété susceptible (Bussard) et une variété résistante (Dream). Le succès de la validation qualitative dépasse 90 % à Everlange et atteint 96 à 98 % à Reuland pour les variétés sensibles et les variétés résistantes. Concernant la validation quantitative, les tests statistiques révèlent un grand succès de Proculture pour les

variétés sensibles pendant toutes les années de validation. Cependant, une sous-estimation a été observée pour les variétés résistantes.

Parallèlement à cette étude sur la septoriose, une étude a été développée sur les deux rouilles du blé d'hiver : a) la rouille jaune qui a connu un développement spectaculaire sur les variétés susceptibles (Flair). Cette maladie a eu un développement très précoce en 2000 (stade gonflement). Les premiers foyers ont été observés dès la floraison. Un modèle de simulation de cette maladie a été proposé dans cette étude ; b) la rouille brune, qui a une évolution très importante entre 1999 et 2000 à Everlange et qui constitue la principale maladie de la Moselle luxembourgeoise. Elle se répète au fil des années et à des moments cruciaux de la croissance du blé d'hiver. Dans cette étude, nous analysons les paramètres météorologiques nocturnes qui favorisent cette maladie.

En plus des deux rouilles, l'helminthosporiose a connu une évolution remarquable dans les variétés susceptibles entre 1999 et 2000 à Everlange. L'interaction de ces variétés avec un semis sans labour et des conditions météorologiques favorables a été à l'origine de l'expansion très précoce de la maladie en 2000. Cette interaction entre les variétés susceptibles, le microclimat au sein du couvert et certaines pratiques agricoles (la fumure azotée, ...) a été à l'origine de la propagation de l'oïdium en 2000 en Moselle et en 2003 à Reuler.

Enfin, cette étude présente aussi une méthode d'analyse conceptuelle des paramètres météorologiques basée sur la transformation de Fourier. Cette analyse permet de visualiser les différentes fluctuations intra-journalières qui existent entre les sites d'essai. A long terme, il sera possible, avec cette méthode d'automatiser des cartes de risque d'infection des parasites cryptogamiques du blé d'hiver.

---

**Mots-clés :** essai, paramètres météorologiques, variété, blé d'hiver, plante, feuille, système, simulation, *Septoria tritici*, rouille jaune, rouille brune, helminthosporiose, oïdium, analyse, validation, conception, phyllotherme.

---