



HAL
open science

Influence de l'architecture du couvert de blé et de la technique de pulvérisation à bas volume sur l'interception foliaire du fongicide et le développement de *Septoria tritici*

Jessica da Costa

► **To cite this version:**

Jessica da Costa. Influence de l'architecture du couvert de blé et de la technique de pulvérisation à bas volume sur l'interception foliaire du fongicide et le développement de *Septoria tritici*. Sciences agricoles. 2012. dumas-00781092

HAL Id: dumas-00781092

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00781092v1>

Submitted on 25 Jan 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AGROCAMPUS OUEST

CFR Rennes

65 rue de Saint-Brieuc

CS 84215, 35 042

Rennes Cedex / France

ARVALIS - Institut du végétal

**Service Agronomie – Economie -
Environnement**

Station Expérimentale

91720 Boigneville / France

Mémoire de Fin d'Études

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences
Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : 2011-2012

Spécialisation : Sciences et Productions Végétales

Option : Ingénierie des Agrosystèmes

**Influence de l'architecture du couvert de blé et de la technique de
pulvérisation à bas volume sur l'interception foliaire du fongicide
et le développement de *Septoria tritici***

Par : Jessica DA COSTA

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation*
définitive)

Bon pour dépôt (version

Date :/.../... Signature :
Non

Autorisation de diffusion : Oui

Devant le jury :

Soutenu à Rennes le 12/09/2012

Sous la présidence de : Christine BISSUEL

Maître de stage : Benjamin PERRIOT

Enseignant référent : Dominique POULAIN

Membre extérieur : Maxime TROTET

Avec la participation de : Christophe LE MAY

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent
que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".

Fiche de diffusion du mémoire

A remplir par l'auteur⁽¹⁾ avec le maître de stage.

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

Préciser les limites de la confidentialité⁽²⁾ :

➤ Confidentialité absolue : oui non

(ni consultation, ni prêt)

↳ Si oui 1 an 5 ans 10 ans

➤ A l'issue de la période de confidentialité **ou** si le mémoire n'est pas confidentiel,

Merci de renseigner les éléments suivants :

Référence bibliographique diffusable⁽³⁾ : oui non

Résumé diffusable : oui non

Mémoire consultable sur place : oui non

Reproduction autorisée du mémoire : oui non

Prêt autorisé du mémoire : oui non

.....

Diffusion de la version numérique du résumé : oui non

↳ Si oui, l'auteur⁽¹⁾ complète l'autorisation suivante :

Je soussigné(e) Jessica Da Costa, propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.

Date : 24/08/2012

Signature :

Rennes, le 24/08/2012

Le maître de stage⁽⁴⁾,

L'auteur⁽¹⁾,

L'enseignant référent,

(1) auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(2) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(3) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé.

(4) Signature et cachet de l'organisme.

Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier mon maître de stage Benjamin PERRIOT, ingénieur spécialisé en pulvérisation, pour ses conseils, sa sympathie et son soutien tout au long de mon travail.

Je remercie également David GOUACHE, ingénieur spécialisé en Ecophysiologie et co-encadrant ce travail, pour avoir contribué à la réflexion lors de l'élaboration du mémoire.

Merci aussi à Damien GAUDILLAT et Kevin FORGEOT, les techniciens du Service Agronomie – Economie - Environnement à Arvalis - Institut du Végétal, pour leur travail au quotidien et leur collaboration lors des essais en pleins champs.

Je tiens à remercier François PIRAUX, ingénieur spécialisé en systèmes d'information et méthodologie, pour le partage de ses connaissances.

Un grand merci à l'équipe Environnement et Grandes Cultures (EGC) de l'INRA de Grignon en particulier à Mariem ABICHOU, Ingénieure d'études et Corinne ROBERT, Chargée d'études, pour leur disponibilité permanente et leur réactivité à répondre à mes questions.

Je remercie également Marc BIDON et Josiane JEAN-JACQUES respectivement Adjoint technicien et technicienne de recherche à l'UMR EGC de l'INRA de Grignon, pour leur aide et esprit d'équipe.

J'aimerais adresser un remerciement particulier à Sébastien SAINT-JEAN, Maître de conférences à l'UMR EGC, qui m'a aidé pour le modèle d'interception foliaire.

Je n'oublie pas de remercier mes amis de la station expérimentale pour tous les moments agréables que nous avons partagés.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
1 LA SEPTORIOSE, UN PROBLEME MAJEUR EN CULTURE DE BLE TENDRE	2
1.1 <i>Contexte et nuisibilité en France</i>	2
1.2 <i>Symptômes de la maladie</i>	2
1.3 <i>Epidémiologie de la septoriose sur blé</i>	3
1.3.1 Deux formes de champignons pour une même maladie	3
1.3.2 Le cycle infectieux	3
1.3.3 Dispersion	4
1.4 <i>Méthodes de lutte contre la septoriose du blé</i>	4
1.4.1 Les fongicides	4
1.4.2 La lutte génétique	7
2 ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE TRAITEMENT FONGICIDE ET COUVERT VEGETAL PAR LA MESURE DE L'INTERCEPTION FOLIAIRE.....	8
2.1 <i>Propriétés physiques et chimiques de l'interface feuille-solution-air</i>	8
2.2 <i>Efficacité d'impact : interaction entre la taille des gouttes et l'architecture du couvert</i>	9
2.3 <i>Influence de l'épiderme des feuilles sur la rétention</i>	9
2.4 <i>Interaction entre le produit phytosanitaire et l'architecture</i>	9
3 ETUDE DES INTERACTIONS MULTIPLES PAR DES MODELES ARCHITECTURES : INSERTION DE CE TRAVAIL DANS LE PROJET DE RECHERCHE ECHAP	10
CHAPITRE 1 : ETUDE DES APPLICATIONS FONGICIDES REALISEES DANS L'ESSAI.....	12
1 MATERIELS ET METHODE.....	12
1.1 <i>Matériel végétal</i>	12
1.2 <i>Traitements fongicides</i>	12
1.2.1 Dispositif expérimental 2011-2012	12
1.2.2 Matériel de pulvérisation	13
1.3 <i>Evaluation de la maladie de septoriose</i>	15
1.4 <i>Mesures physiologiques</i>	15
2 RESULTATS DES APPLICATIONS FONGICIDES CONTRE LA SEPTORIOSE	16
2.1 <i>Dynamique de développement de la maladie</i>	16
2.2 <i>Influence des facteurs sur l'efficacité biologique</i>	18
2.3 <i>Distinction entre les différents traitements</i>	18
2.3.1 L'effet dose sur l'efficacité biologique	19
2.3.2 L'effet volume sur l'efficacité biologique	20
2.3.3 Interaction Dose : Volume.....	20
2.4 <i>Influence des facteurs sur le poids de mille grains</i>	21
2.5 <i>Influence des facteurs sur le rendement</i>	22
3 DISCUSSION DES APPLICATIONS FONGICIDES CONTRE LA SEPTORIOSE.....	23
3.1 <i>Comparaison des résultats entre saisons</i>	23
3.2 <i>Les bas volumes sont aussi efficaces que les volumes de bouillie conventionnels.</i>	24
3.3 <i>La date du traitement ne doit pas être négligée</i>	25
3.4 <i>Modifier la dose peut compromettre l'efficacité biologique et potentiellement la récolte</i>	25
CHAPITRE 2 : MESURE DE L'INTERCEPTION FOLIAIRE.....	26
1 MATERIELS ET METHODE	26
1.1 <i>Suivi du dépôt à partir d'un traceur</i>	26
1.1.1 Extraction de Tartrazine	26
1.1.2 Méthode de comparaison du dépôt	27
1.2 <i>Elaboration d'un modèle explicatif</i>	27
2 RESULTATS DES MANIPULATIONS SUR L'INTERCEPTION FOLIAIRE.....	28
2.1 <i>Expérience préliminaire : étude de la cible biologique</i>	29
2.2 <i>Bilan de masse</i>	29
2.3 <i>Etude de la quantité totale de traceur déposée en fonction de la dose appliquée</i>	30
2.4 <i>Quantité déposée par unité de surface</i>	32
2.5 <i>Modèle interception foliaire</i>	34

2.5.1	Choix des modèles de régression	34
2.5.2	Présentation des résultats	34
3	DISCUSSION DE L'EXPERIENCE SUR L'INTERCEPTION FOLIAIRE.....	36
3.1	<i>Plus de produit déposé au stade DFE qu'au stade 2N</i>	36
3.2	<i>Evolution du spectre de rétention</i>	37
3.2.1	Distribution du dépôt au stade 2 nœuds	37
3.2.2	Distribution du dépôt au stade dernière feuille étalée	37
3.3	<i>Un gradient de rétention en fonction du volume</i>	37
3.4	<i>Comparaison des résultats entre saisons</i>	38
3.4.1	Différences entre les deux campagnes d'expérimentation	38
3.4.2	Les différences entre Mercia et Rht3.	39
3.5	<i>Modèle d'interception foliaire</i>	40
3.6	<i>Perspectives d'amélioration : la taille de l'échantillonnage</i>	40
CONCLUSION		41

Table des annexes

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE	I
LISTE SITOGRAPHIQUE.....	IV
ANNEXE I ECHELLE DE ZADOKS.....	V
ANNEXE II COMPARAISON DE LA STRUCTURE EPICUTICULAIRE DE DIFFERENTES ESPECES.....	VI
ANNEXE III DISPOSITIF DE L'ESSAI EN 2010- 2011.....	VII
ANNEXE IV DISPOSITIF DE L'ESSAI EN 2011-2012.....	IX
ANNEXE V MATERIEL UTILISE	X
ANNEXE VI CHOIX ET REGLAGE DES BUSES	XI
ANNEXE VII CORRESPONDANCES DATE ET DEGRE JOURS	XII
ANNEXE VIII METHODE ET LIGNES DE COMMANDES R POUR LES CONTRASTES	XIII
ANNEXE IX VALIDATION DES POSTULATS DE L'ANALYSE DE VARIANCE A 1 FACTEUR POUR L'EFFICACITE BIOLOGIQUE (CHAPITRE 1 § 2.3).....	XVI
ANNEXE X COMPARAISONS DE MOYENNES POUR LES VARIABLES PMG ET RENDEMENT (CHAPITRE 1 § 2.5).....	XVII
ANNEXE XI EVALUATION DE LA MALADIE, CAMPAGNE 2010-2011.....	XVIII
ANNEXE XII DISPOSITIF MIS EN PLACE POUR LES MESURES D'INTERCEPTION FOLIAIRE	XX
ANNEXE XIII CALIBRATION E 102 A 430 NM.....	XXI
ANNEXE XIV SURFACES MOYENNES ET LAI DES FEUILLES DE BLE	XXII
ANNEXE XV PROPORTION DE LA QUANTITE DE TARTRAZINE RETENUE SUR LE BLE AUX STADES 2N ET DFE	XXIII
ANNEXE XVI SORTIES R DE L'ANOVA A DEUX FACTEURS (VOLUME ET STADE) (CHAPITRE 2 § 2.3).....	XXIV
ANNEXE XVII VALIDATION DES POSTULATS DE L'ANOVA A DEUX FACTEURS (VOLUME ET STADE) (CHAPITRE 2 § 2.3).....	XXV
ANNEXE XVIII RESULTATS ANOVA A TROIS FACTEURS (NIVEAU, VOLUME, STADE) (CHAPITRE 2 § 2.4) ..	XXVI
ANNEXE XIX VALIDATION DES POSTULATS DE L'ANOVA A TROIS FACTEURS (NIVEAU, STADE, VOLUME) (CHAPITRE 2 § 2.4).....	XXVII
ANNEXE XX TEST DE TUKEY COMPARAISON DES MOYENNES POUR L'INTERACTION STADE : NIVEAU (CHAPITRE 2 § 2.4)	XXVIII
ANNEXE XXI EQUATIONS DES DIFFERENTS MODELES D'INTERCEPTION FOLIAIRE.....	XXX
ANNEXE XXII VALEURS PREDITES PAR LE MODELE EN FONCTION DES VALEURS OBSERVEES : ADEQUATION AVEC LA BISSECTRICE.....	XXXIII
ANNEXE XXIII EXEMPLES DE DEPOTS DE CIRES EPICUTICULAIRES	XXXV
ANNEXE XXIV COMPARAISON DE LA GEOMETRIE DES FEUILLES ENTRE STADES POUR TREMIE	XXXVI
ANNEXE XXV CONDITIONS D'APPLICATION DE LA TARTRAZINE AU STADE DFE	XXXVII
ANNEXE XXVI RESULTATS DE LA CAMPAGNE 2010- 2011	XXXVIII

Table des figures

FIGURE 1: PYCNIDES DE SEPTORIOSE SUR FEUILLE DE BLE	2
FIGURE 2: CYCLE DE DEVELOPPEMENT DE SEPTORIA TRITICI ET MYCOSPHAERELLA GRAMINICOLA (BAYER AGRI).....	3
FIGURE 3: TROIS EXEMPLES DE TRAITEMENT FONGICIDE. TX = TRAITEMENT N°X (JØRGENSEN ET AL., 2008).....	5
FIGURE 4: INTERET DE LA CONCENTRATION DE LA MATIERE ACTIVE SUR LA PENETRATION DU PRODUIT DANS LA FEUILLE, HYPOTHESE DE RECHERCHE (ACTION DISTRIBUTION DIRECTE, 2010)	6
FIGURE 5: LES FACTEURS IMPLIQUES DANS LE TRANSPORT DES MATIERES ACTIVES	8
FIGURE 6: SCHEMA RECAPITULATIF DES INTERACTIONS MULTIPLES	11
FIGURE 7: SCHEMA PRESENTANT LES FACTEURS AFFECTANT LE VOLUME DE BOUILLIE.....	14
FIGURE 8: PROTOCOLE NOTATION MALADIE SUR FEUILLE DE BLE	15
FIGURE 9: DYNAMIQUE DE LA MALADIE AU COURS DU CYCLE CULTURAL EN 2012.	16
FIGURE 10: PROGRESSION DE LA MALADIE EN 2012 SUR LES QUATRE DERNIERS NIVEAUX FOLIAIRES. EN BLEU LE TEMOIN NON TRAITE ET EN ORANGE LA REFERENCE (MODALITE 2).	17
FIGURE 11: EFFICACITE BIOLOGIQUE EN FONCTION DES TRAITEMENTS	18
FIGURE 12: CLASSIFICATION EN FONCTION DES MOYENNES POUR LE FACTEUR DOSE_VOLUME	19
FIGURE 13: PMG EN FONCTION DU VOLUME ET DE LA DOSE.....	21
FIGURE 14: RENDEMENT EN (Q/HA) EN FONCTION DU VOLUME ET DE LA DOSE.....	22
FIGURE 15: EVOLUTION DE LA SOMME DES PLUIES SUR LA STATION ARVALIS-INSTITUT DU VEGETAL, BOIGNEVILLE, CAMPAGNES 2010-2011 ET 2011-2012. LES DECILES ET LES MEDIANES SONT CALCULES SUR 20 ANS	23
FIGURE 16: EFFICACITE BIOLOGIQUE DES TRAITEMENTS	24
FIGURE 17: RENDEMENT DES TRAITEMENTS	24
FIGURE 18: ZONE DE TRIPLE RECOUVREMENT CREEE PAR LE JET DE PULVERISATION. EN NOIR, LA RAMPE ET LES SIX BUSES ET EN BLEU LES JETS DE PULVERISATION ET LA ZONE DE TRIPLE RECOUVREMENT HACHUREE. (ARVALIS-INSTITUT DU VEGETAL)	26
FIGURE 19: SCHEMA D'INTERCEPTION LUMINEUSE SUR LA CANOPEE. (BALANDIER ET AL., 2010).....	28
FIGURE 20: BILAN DES ENTREES ET SORTIES DE TRACEUR PAR RAPPORT AU REFERENTIEL COUVERT VEGETAL	29
FIGURE 21: COMPARAISON DES MOYENNES POUR LE FACTEUR VOLUME	31
FIGURE 22: RELATION ENTRE LE DEPOT ET LE VOLUME. VALEURS POUR LES DEUX BLOCS AUX DEUX STADES	31
FIGURE 23: RELATION ENTRE LA RETENTION ET LE VOLUME EN FONCTION DES STADES	32
FIGURE 24: QUANTITE DEPOSEE EN NG/CM ² DE FEUILLE PAR G/HA DE COLORANT APPLIQUE A LA PARCELLE ELEMENTAIRE	32
FIGURE 25: REGRESSION LINEAIRE POUR MERCIA ET RHT3 AUX STADES 2N ET DFE	35
FIGURE 26: REGRESSION LINEAIRE POUR TREMIE AUX STADES 2N ET DFE. EN ROUGE : 40 L/HA, BLEU : 80 L/HA, VERT 150 L/HA ET ORANGE 200 L/HA.	35
FIGURE 27: DEVELOPPEMENT DE LA PLANTE DE BLE (ARVALIS - INSTITUT DU VEGETAL)	V
FIGURE 28: OBSERVATION AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE SUR LES FACES FOLIAIRES ADAXIALES DU GAILLET (A) ET DU COLZA (B) SOURCE: (GAUVRIT, 1996)	VI
FIGURE 29: DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE LA CAMPAGNE 2010-2011	VII
FIGURE 30: DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE LA CAMPAGNE 2011-2012	IX
FIGURE 31: ORIENTATION DE L'ESSAI 2011-2012	IX
FIGURE 32: QUAD EQUIPE D'UN PULVERISATEUR A AIR COMPRIME	X
FIGURE 33: STATION METEOROLOGIQUE PLACEE SUR L'ESSAI ECHAP A LA STATION BOIGNEVILLE, ARVALIS – INSTITUT DU VEGETAL	
FIGURE 34: BUSES XR TEEJET (TEEJET TECHNOLOGIES, 2012)	XI
FIGURE 35: VALIDATION DES POSTULATS DE L'ANALYSE DE VARIANCE A 1 FACTEUR POUR L'EFFICACITE BIOLOGIQUE	XVI
FIGURE 36: TEST DE TUKEY EFFECTUE SUR LE PMG POUR LES DIFFERENTS TRAITEMENTS EN FONCTION DE LA DOSE	XVII
FIGURE 37: COMPARAISON DES MOYENNES POUR LE RENDEMENT ENTRE LES DIFFERENTS TRAITEMENTS EN FONCTION DE LA DOSE	XVII
FIGURE 38: DYNAMIQUE DE LA MALADIE EN 2011	XVIII
FIGURE 39: SEVERITE DE LA MALADIE EN 2011.....	XIX
FIGURE 40: VUE D'ENSEMBLE DES BOITES DE PETRI EN HAUTEUR (STADE DFE)	XX
FIGURE 41: BOITE DE PETRI AU SOL (STADE 2N)	XX
FIGURE 42: VALIDATION GRAPHIQUE DES POSTULATS DE L'ANALYSE DE VARIANCE A DEUX FACTEURS POUR LA VARIABLE INTERCEPTION.....	XXV
FIGURE 43: VALIDATION GRAPHIQUE DES POSTULATS DE L'ANALYSE DE VARIANCE A TROIS FACTEURS SUR LA VARIABLE INTERCEPTION	XXVII
FIGURE 44: HISTOGRAMME DE FREQUENCE DES RESIDUS	XXVII
FIGURE 45: COMPARAISON DES DIFFERENTS NIVEAUX FOLIAIRES POUR LE STADE 2N	XXVIII
FIGURE 46: COMPARAISON DES DIFFERENTS NIVEAUX FOLIAIRES POUR LE STADE DFE.....	XXIX

FIGURE 47: VALIDATION DU MODELE (STADE 2N)	XXXIII
FIGURE 48: VALIDATION DU MODELE (STADE DFE).....	XXXIV
FIGURE 49: BATONNETS POLYGONAUX (C), BATONNETS ENROULES (D) (BARTHLOTT ET AL., 1998).....	XXXV
FIGURE 50: PLAQUETTES (E), PLAQUETTES MEMBRANEUSES (F) (BARTHLOTT ET AL., 1998)	XXXV
FIGURE 51: PORT DE PLANTE AU STADE DFE, VARIETE TREMIE. CADRE NOIR DE DIMENSION 30X80 CM	XXXVI
FIGURE 52: PORT DE PLANTES AU STADE 2N, VARIETE TREMIE. LA LIGNE BLANCHE HORIZONTALE MESURE 60 CM	XXXVI
FIGURE 53: VITESSE DU VENT EN FONCTION DU TEMPS AU MOMENT DU TRAITEMENT A LA TARTRAZINE AU STADE DFE	XXXVII
FIGURE 54: HYGROMETRIE ET TEMPERATURE AU MOMENT DU TRAITEMENT A LA TARTRAZINE AU STADE DFE	XXXVII
FIGURE 55: QUANTITE DEPOSEE EN NG/CM ² DE FEUILLE PAR G/HA DE COLORANT APPLIQUE A LA PARCELLE ELEMENTAIRE POUR LA VARIETE MERCIA	XXXVIII
FIGURE 56: QUANTITE DEPOSEE EN NG/CM ² DE FEUILLE PAR G/HA DE COLORANT APPLIQUE A LA PARCELLE ELEMENTAIRE POUR LA VARIETE RHT3	XXXVIII
FIGURE 57: QUANTITE TOTALE RETENUE PAR LA VARIETE MERCIA.....	XXXIX
FIGURE 58: QUANTITE TOTALE RETENUE PAR LA VARIETE RHT3.....	XXXIX

Table des tableaux

TABLEAU 1: CLASSES POUR LES CEREALES EN FONCTION DU VOLUME (PERRIOT, 2012).....	6
TABLEAU 2: MODALITES ETUDIEES LORS DE LA CAMPAGNE 2011-2012	13
TABLEAU 3: COMBINAISONS DES MODALITES DE TOUS LES FACTEURS ETUDIES EN 2011-2012.....	13
TABLEAU 4: MATERIEL DE PULVERISATION ET CONDITIONS D'APPLICATION (2011-2012)	14
TABLEAU 5: RESULTATS DE L'ANOVA A 1 FACTEUR.....	19
TABLEAU 6: RESULTATS DU TEST DE STUDENT POUR LES CONTRASTES TESTANT L'EFFET DOSE	19
TABLEAU 7: RESULTATS DU TEST DE STUDENT POUR LES CONTRASTES TESTANT L'EFFET VOLUME	20
TABLEAU 8: RESULTATS DU TEST DE STUDENT POUR LES CONTRASTES TESTANT L'INTERACTION DOSE: VOLUME	20
TABLEAU 9: RECAPITULATIF DES CONTRASTES ET ANALYSES DE VARIANCES EFFECTUES SUR LA VARIABLE PMG	21
TABLEAU 10: RECAPITULATIF DES CONTRASTES ET ANALYSES DE VARIANCES EFFECTUES SUR LA VARIABLE RENDEMENT	22
TABLEAU 11: QUANTITES APPLIQUEES EN FONCTION DES CAMPAGNES ET DES VOLUMES	27
TABLEAU 12: RESULTATS DE L'ANALYSE DE VARIANCE A DEUX FACTEURS (STADE ET VOLUME)	30
TABLEAU 13: RESULTATS DE L'ANOVA A TROIS FACTEURS: STADE, VOLUME, NIVEAU FOLIAIRE	33
TABLEAU 14: COMPARAISON DES MODELES EMBOITES	34
TABLEAU 15: PROPRIETES DES SURFACES FOLIAIRES DE QUELQUES PLANTES	VI
TABLEAU 16: MODALITES ETUDIEES LORS DE LA CAMPAGNE 2010-2011	VIII
TABLEAU 17: COMBINAISONS DES MODALITES (TRAITEMENTS) DE TOUS LES FACTEURS ETUDIES EN 2010-2011	VIII
TABLEAU 18: CONDITIONS D'APPLICATION LORS DES TRAITEMENTS FONGICIDES	X
TABLEAU 19: CORRESPONDANCE ENTRE LES DATES ET L'AGE DE LA PLANTE 2012	XII
TABLEAU 20: SORTIE R DU TEST DE BARTLETT.....	XVI
TABLEAU 23: CORRESPONDANCE DES DEGRES JOURS AUX DATES (2010-2011)	XVIII
TABLEAU 29: DIMENSIONS DES FEUILLES EN FONCTION DE LA VARIETE ET DU STADE	XXII
TABLEAU 30: LAI CALCULE A PARTIR DES TROIS OU QUATRE DERNIERES FEUILLES	XXII
TABLEAU 24: QUANTITE DE TARTRAZINE RETENUE EN FONCTION DE LA VARIETE, DU STADE ET DU VOLUME.....	XXIII
TABLEAU 25: SORTIE R DU TEST DE BARTLETT.....	XXV
TABLEAU 26: COMPARAISON DES DIFFERENTS STADES EN FONCTION DES NIVEAUX FOLIAIRES	XXIX
TABLEAU 27: LES MODELES DE REGRESSION LINEAIRE AVEC ORDONNEE A L'ORIGINE	XXX
TABLEAU 28: MODELE RETENU : COMPLET PAR VOLUME PAR STADE ET PAR VARIETE SANS ORDONNEE A L'ORIGINE	XXXII

Lexique

Deux nœuds : où le 2ème nœud est à plus de 2 cm au-dessus du premier nœud.

Dernière feuille étalée : où le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible.

Modalité : Les différents éléments qui constituent un facteur qualitatif sont appelés modalités.

Phyllochrone : Rythme d'apparition des feuilles. Intervalle de temps thermique, généralement exprimé en degrés-jours, qui sépare l'apparition de chaque feuille d'un végétal.

Traitements : En statistiques, il s'agit de la combinaison de niveaux ou modalités de tous les facteurs étudiés.

Volume Median Diameter : indique que la moitié des gouttes ont un diamètre inférieur à cette valeur et l'autre moitié a un diamètre supérieur.

Liste des abréviations

2N: Stade phénologique du blé « 2 nœuds »

ADAS: Agricultural Development Advisory Service, Institut technique en agriculture au Royaume-Uni.

AIC : Akaike's Information Criterion, une mesure statistique permettant de départager des modèles entre eux.

ANOVA: ANalysis Of Variance (Analyse de variance).

AUDPC: Area Under Disease Progress Curve (Mesure de l'aire sous la courbe de progression d'une maladie).

DFE: Stade phénologique du blé « dernière feuille étalée »

ENDURE : European Network for Durable Exploitation of crop protection strategies, Réseau d'Excellence.

F1: Dernière feuille ligulée de blé (sommet de la canopée).

F2 : Avant dernière feuille ligulée de blé.

F3 : Troisième feuille ligulée.

F4: Quatrième feuille ligulée.

GSZ: Growth Stages of the Zadoks decimal code for cereals (Unité de l'état d'avancement physiologique des céréales).

INRA UMR EGC : Institut National de Recherche Agronomique Unité Mixte de Recherche en Environnement et Grandes Cultures.

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture.

LAI : Leaf Area Index (Indice de surface Foliaire).

PMG : Poids de Mille Grains.

SDHI : Succinate Dehydrogenase Inhibitor (Inhibiteur de la succinate déshydrogénase).

T1 : Premier traitement fongicide (13/04/2012).

T2 : 2ème traitement fongicide (11/05/2012).

VMD: Volume Median Diameter

Introduction

Le Grenelle de l'Environnement permet d'aboutir à des engagements en faveur de l'environnement dont le plan Ecophyto 2018. Ce dernier vise à réduire de 50 % l'usage des produits phytosanitaires au niveau national d'ici 2018, si possible. Ainsi, l'objectif est de diminuer la dépendance des exploitations agricoles face à la lutte chimique, tout en maintenant un niveau élevé de production agricole, en quantité et en qualité. Or, la septoriose du blé tendre (*Triticum aestivum*) est la maladie qui requiert le plus de fongicides en France. Il est désormais crucial d'associer la lutte chimique à l'utilisation des variétés résistantes ou tolérantes et à la régulation des bio-agresseurs par des techniques culturales.

Il s'agit d'innover dans la conception et la mise au point de systèmes de cultures économes en pesticides. Une marge de réduction de ces derniers est possible via les techniques d'application : certains agriculteurs disent maîtriser les maladies du feuillage avec des doses par hectare équivalentes à 20 % de celles classiquement utilisées, grâce à des techniques d'application à bas volume mais aucune publication ne le confirme. De plus, l'architecture du couvert influence les épidémies mais également l'interception des fongicides et donc l'efficacité des traitements. Géométrie du couvert et volumes de bouillie semblent être des leviers importants dans la lutte contre les maladies foliaires.

En résumé, l'élaboration de stratégies raisonnant architecture du couvert, date, dose et technique d'application devrait permettre de diminuer significativement la dépendance aux fongicides. Cependant, les interactions architecture du couvert-développement épidémique-interception des fongicides sont peu étudiées jusqu'à présent. C'est dans ce contexte qu'Arvalis - Institut du végétal et l'UMR EGC (Inra AgroParisTech) ainsi que d'autres organismes ont créé le projet collaboratif ECHAP visant à « Réduire l'utilisation des fongicides en associant stratégies de traitements optimales et couverts ECHAPpants aux maladies ». L'objectif est donc de réduire la fréquence des traitements et des doses de fongicides appliqués tout en optimisant les mécanismes naturels d'échappement aux maladies, en particulier pour lutter contre la septoriose.

Afin de répondre à la question : « Comment l'architecture du couvert de blé et la technique de pulvérisation à bas volume peuvent influencer le développement de *Septoria tritici* ? » nous avons cherché à réaliser différentes expériences en traitements fongicides et des mesures d'interception foliaire de bouillie phytosanitaire.

Cette problématique soulève une multitude de questions auxquelles ce stage vise à répondre :

- De quelle façon la canopée intercepte-t-elle le traitement ?
- Le volume de bouillie influence-t-il le dépôt de fongicide sur la plante ?
- Peut-on, en jouant sur les différents leviers, réduire la dose de fongicide sans pour autant diminuer l'efficacité du traitement ?

Le mémoire présente dans un premier temps une synthèse bibliographique permettant de positionner l'enjeu et les difficultés des leviers énoncés précédemment. Par la suite, un premier chapitre est dédié au développement de la maladie lors des applications fongicides à bas volume. Finalement, le deuxième chapitre est consacré aux mesures d'interception du fongicide sur la canopée.

Synthèse bibliographique

1 La septoriose, un problème majeur en culture de blé tendre

1.1 Contexte et nuisibilité en France

Quatrième producteur mondiale de blé (FAO stat, 2010), la France occupe une position concurrentielle. La production française de blé tendre atteint 36 millions de tonnes, soit 26% de la production de l'Union Européenne (138 millions de tonnes).

La culture de blé est soumise à de nombreux problèmes de ravageurs et parasites. La septoriose est la maladie du blé la plus dommageable en Europe (Gouache et Jorgensen, 2008) avec une nuisibilité moyenne interannuelle de 15 q/ha et des pertes maximales pouvant dépasser 50 % en absence de traitements fongicides (expertise des instituts d'Endure). En France, les fongicides sur blé sont utilisés en premier lieu pour lutter contre cette maladie. Elle se rencontre partout sur le territoire français, avec une présence plus régulière dans la moitié Nord et l'Ouest du pays. Cependant, tous les grands bassins céréaliers sont impactés.

La maladie se manifeste par des taches foliaires qui réduisent la photosynthèse par une réduction de la surface verte photosynthétique et, par conséquent, le rendement. Elle est d'autant plus dommageable lorsqu'elle attaque précocement les dernières feuilles de blé, les plus contributrices au rendement.

Deux agents pathogènes sont responsables de la septoriose et plus particulièrement deux champignons ascomycètes : *Mycosphaerella graminicola* et *Phaeosphaeria nodorum*. Bien qu'ils appartiennent au même genre, ils sont très différents en termes de biologie et de morphologie. Depuis 1980, c'est *Mycosphaerella graminicola* qui domine sur le territoire agricole, c'est pourquoi nous nous limiterons à cet agent pathogène.

1.2 Symptômes de la maladie



Figure 1: Pynides de septoriose sur feuille de blé

Les premières lésions apparaissent après une période d'incubation qui peut aller d'une semaine à un mois. Ces symptômes sont d'abord des chloroses qui deviennent au fur et à mesure des nécroses sur lesquelles apparaissent des points noirs dit pynides. Les lésions sont généralement allongées et légèrement rectangulaires, orientées dans le sens des nervures de la feuille et délimitées par celles-ci (Figure 1). La période de risque de contamination se situe entre le stade 2 nœuds et le stade floraison.

1.3 Epidémiologie de la septoriose sur blé

1.3.1 Deux formes de champignons pour une même maladie

Mycosphaerella graminicola et *Septoria tritici* sont les deux formes du champignon responsable de la septoriose. La première est la forme sexuée, surtout détectée dans les chaumes de blé en automne et constitue l'inoculum primaire grâce aux ascospores. La seconde se développe pendant la phase végétative de la culture à l'aide des pycnidiospores qui assurent la propagation de la maladie lors de la saison culturale (Figure 2).

1.3.2 Le cycle infectieux



Figure 2: Cycle de développement de *Septoria tritici* et *Mycosphaerella graminicola* (Bayer Agri)

Le cycle infectieux se déroule en plusieurs étapes, du dépôt des spores sur les feuilles jusqu'à la sporulation. La germination des spores se fait dans les 12 heures après contact foliaire et la pénétration par les stomates ou au travers des cellules épidermiques a lieu après 24 heures (Eyal, 1987). Dans un premier temps, le pathogène est biotrophe (période d'incubation) mais par la suite, il change de type trophique et induit des destructions cellulaires à l'origine des nécroses simultanément à la phase de croissance la plus importante de sa biomasse. Ensuite, les hyphes reproducteurs se développent ce qui aboutit à la formation des pycnides puis la sporulation (Robert et al., 2009).

L'infection nécessite que les feuilles soient maintenues mouillées pendant 6 heures. Une infection maximale requiert au moins 48 heures d'humectation des feuilles. De plus, son optimum de développement est 20-25°C (Eyal, 1987). Néanmoins, le champignon supporte assez bien des périodes d'interruption d'humidité (Shaw et Royle, 1993).

Après infection, le cycle de développement du champignon dure 21 à 28 jours et se termine par la production des pycnides. Celles-ci sont localisées dans les chambres sous-stomatiques et portent une nouvelle génération de spores, les pycnidiospores qui sont enfermées dans une gelée dite cirrhe.

1.3.3 Dispersion

Une forte augmentation de l'humidité provoque un gonflement du sac où se trouvent les spores. Les pycnides libèrent leurs spores et sont véhiculées de feuilles en feuilles par les éclaboussures lors de fortes pluies : c'est l'effet splashing. La maladie progresse ainsi verticalement d'étage foliaire en étage foliaire du bas vers le haut (Royle et al., 1986). Les feuilles du haut de la canopée présentent donc des niveaux d'attaque plus faibles que sur les feuilles du bas.

1.4 Méthodes de lutte contre la septoriose du blé

Des leviers ont été identifiés pour lutter contre les maladies. Tout d'abord il y a la lutte chimique raisonnée qui inclut les outils d'aide à la décision, le respect des seuils d'intervention et l'optimisation et la réduction de doses. D'autres solutions existent comme l'utilisation des ressources génétiques, le recours à certaines méthodes culturales comme le choix de la date de semis, la densité, une rotation bien choisie et enfin la réduction des niveaux d'azote (Jørgensen et al., 2008).

Il est indispensable de limiter la maladie sur les deux ou trois derniers niveaux foliaires parce que ce sont les dernières feuilles de la canopée qui assurent majoritairement la photosynthèse (Thomas et al., 1989) et permettent le remplissage des grains.

1.4.1 Les fongicides

Pour lutter contre ce champignon la méthode la plus utilisée demeure la lutte chimique. L'application de fongicides durant la période de croissance permet de réduire les pertes de rendement.

Quelles molécules pour lutter contre *M. graminicola* et *S. tritici* ?

Différentes familles sont utilisées aujourd'hui parmi elles, la plus représentée est la famille des triazoles (époconazole et metconazole). On trouve également la famille des imidazoles (prochloraze), strobilurines et les triazolithiones (prothioconazole). Enfin, d'autres produits généralement associés aux triazoles et ayant des modes d'action différents sont aussi employés comme les carboxamides (boscalid), appartenant à la nouvelle famille des SDHI et le chlorothalonil qui a la particularité d'être un multisite (Dollé, 2011).

Les produits systémiques assurent une protection plus longue que les produits de contact et sont utilisés dans la lutte curative. Dans ce mode d'action on retrouve les triazoles dont le but est d'empêcher la biosynthèse des stérols (IDMs). Ils agissent par inhibition de la protéine C14-déméthylase (CYP51), ce qui empêche la synthèse de l'ergostérol, un composant essentiel de la membrane des cellules des champignons, et conduit à leur dépérissement (BASF, 2012). Une spécialité commerciale de cette famille est Opus® de la firme BASF qui contient de l'époconazole et qui sera utilisée par la suite dans cette étude.

Programmes de traitement fongicide

La stratégie de lutte peut s'appuyer sur un, deux et même trois traitements selon la sensibilité de la variété et les conditions climatiques, propices ou non pour le développement de l'agent pathogène. La quantité à investir pour limiter le développement du champignon dépend de la nuisibilité autrement dit de la pression de la maladie. La Figure 3 montre l'importance d'associer le moment d'application du traitement avec le risque de maladie dans trois régions françaises (Jørgensen et al., 2008). Dans le cas général, deux traitements sont effectués. Le premier, appliqué au stade 2N (GSZ 32), vise à limiter la maladie et protéger la F2 ou F3 définitive. Le second traitement s'applique au stade DFE (GSZ 39) afin de protéger les deux dernières feuilles émergées. L'échelle de Zadoks est détaillée en **Annexe I**.

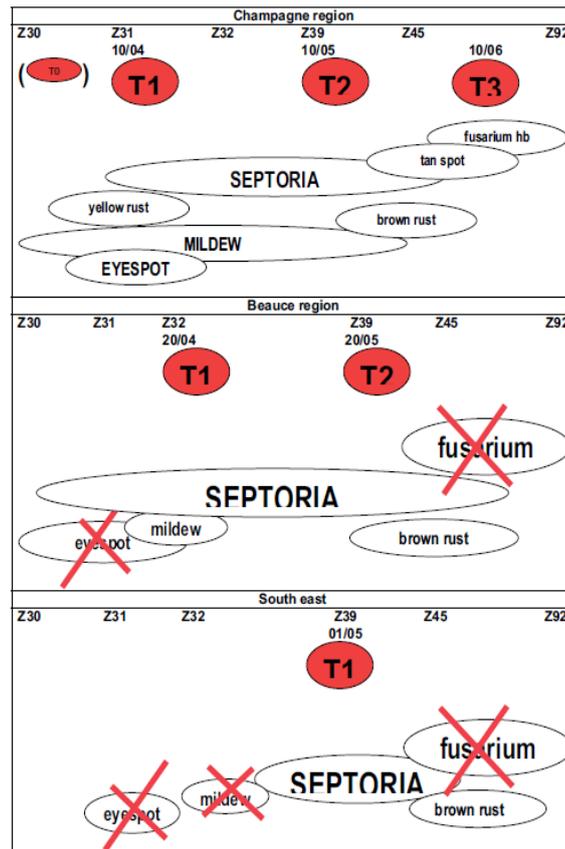


Figure 3: Trois exemples de traitement fongicide. TX = traitement n°X (Jørgensen et al., 2008)

En cas de nuisibilité jugée forte (à partir de 20 q/ha) le coût total des deux traitements s'élève en moyenne à 75 €/ha. Si la nuisibilité est moyenne, la somme est réduite à 55 €/ha. D'autre part, lorsque l'objectif de rendement est élevé, la stratégie à trois traitements est justifiable économiquement (Baudart et al., 2008).

Limites et risques des traitements fongicides

Comme avec presque tous les couples pesticide/cible, les populations de champignons à l'origine des maladies peuvent devenir résistantes à des familles de produits. Sur blé, le territoire français est essentiellement concerné par les résistances de septoriose. *S. tritici* est désormais reconnu comme résistant aux strobilurines sur tout le territoire français. Le phénomène est apparu au début des années 2000 et s'est propagé très rapidement à l'échelle du pays. Des résistances aux triazoles sont également constatées, avec une situation un peu plus complexe. La population des champignons provoquant la septoriose se divise en souches plus ou moins sensibles aux triazoles et c'est la proportion de ces différentes souches qui provoque une plus ou moins grande résistance à ces produits. La diminution de la sensibilité de certaines souches de *S. tritici* aux triazoles est due à la présence de mutations sur CYP51, la protéine cible. Pour le moment, les souches les plus résistantes ne sont pas assez nombreuses pour avoir une influence sur l'efficacité de ces produits (Ferrie, 2010).

La technique du bas volume en pulvérisation : avantages et limites

En France, la technique du bas volume est née dans les années 80 mais peu de références ont été élaborées sur cette méthode jusqu'à présent. La pulvérisation à bas volume a principalement été adaptée aux traitements herbicides mais elle représente également une piste pour améliorer l'efficacité de fongicides, et ainsi, réduire les

quantités à utiliser pour lutter efficacement contre les maladies (Perriot et Denis, 2011a). On classe les volumes dans différentes catégories (Tableau 1):

Tableau 1: Classes pour les céréales en fonction du volume (Perriot, 2012)

>200 l/ha	200 l/ha à 100 l/ha	100 l/ha à 50 l/ha	<40 l/ha
Hauts Volumes	Volumes moyens	Bas volumes	Ultra bas volumes

Bien que peu étudié en grandes cultures, ce principe possède tout de même de grands avantages. Tout d'abord il s'agit d'une économie d'eau. Deuxièmement, la technique nécessite de travailler à une vitesse élevée d'où un gain de temps considérable, et donc un positionnement plus précis sur des fenêtres climatiques optimales (Perriot, 2012). Par ailleurs, nombreux sont ceux qui affirment constater une augmentation de l'efficacité du produit. En effet, d'après ce principe, plus le volume d'eau est faible, plus les co-formulants des produits et les adjuvants de la bouillie sont concentrés, ce qui rend les matières actives plus efficaces notamment les produits systémiques qui pénètrent mieux (Action Distribution Directe, 2010) (Figure 4).

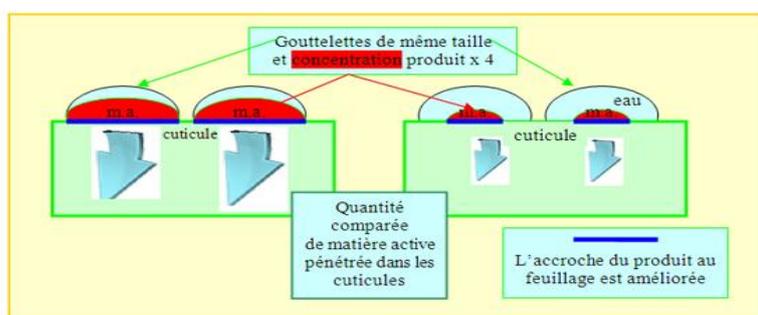


Figure 4: Intérêt de la concentration de la matière active sur la pénétration du produit dans la feuille, hypothèse de recherche (Action Distribution Directe, 2010) .

Si le bas volume est responsable de meilleurs résultats, il est possible de penser à diminuer les doses. Descendre à des volumes inférieurs à 100 l/ha ouvrirait la possibilité d'explorer un gisement d'économies de doses chiffrées autour de 40 % dans les exploitations où la modulation n'était pas pratiquée (Action Distribution Directe, 2010). Des essais sur blé en utilisant quatre dosages différents d'azoxystrobine à volume constant de 167 l/ha ont montré que l'azoxystrobine et d'autres strobilurines peuvent être utilisées à dose réduite entre 25 % et 50 %. Cependant, les résultats sont à moduler selon la climatologie de l'année. Sous des fortes pressions de maladie (fortes pluies), les doses optimales oscillent entre 50 % et 100 % du taux normal en fonction du stade de croissance ce qui suggère que les traitements doivent être adaptés au stade phénologique de la culture (Ginkel et al., 1999).

De nombreux doutes existent tant du point de vue de la qualité de couverture du végétal que de la dérive potentiellement accrue avec la technique du bas volume. Premièrement, le volume de bouillie est lié au débit et à l'inverse de la vitesse d'avancement. Ainsi, si on souhaite diminuer le volume, il est indispensable d'augmenter la vitesse et/ou de réduire le débit de la buse en diminuant son calibre. Cependant, s'il n'y a que le deuxième paramètre qui est modifié, il se peut que cela favorise le bouchage et la dérive de la buse. Il est donc préférable d'ajuster les deux paramètres à la fois. D'autre part, l'application en bas volume exige des vitesses d'avancement comprises entre 8 et 20 km/heure et donc un matériel spécialisé. Pour limiter la dérive, il est indispensable de surveiller la granulométrie des gouttes avec un optimal qui oscille entre 250 et 350 µm de diamètre. Les gouttelettes inférieures à 100 µm de diamètre sont considérées comme pure perte

(dérive, dessiccation). Ainsi, le choix porte souvent sur des buses de petit calibre à fente classique basse pression.

L'efficacité de la technique du bas volume dépendrait de la substance utilisée et du degré d'incidence de la maladie. Il a été démontré que la pulvérisation à bas volume fonctionne mieux avec les herbicides systémiques qu'avec les produits de contact (Perriot et Denis, 2011b). Cependant, si la pression de maladie est forte, les bas volumes fonctionnent moins bien quel que soit le mode d'action du produit (Cooke et al., 1976).

Enfin, cette technique reste à l'état de constat sans qu'il n'y ait de preuves factuelles qui lient la technique du bas volume avec une bonne efficacité biologique. En effet, même si la réduction du volume de bouillie est réalisable avec certains produits, réduction de volume et réduction de dose sont souvent à dissocier. Il semblerait que sauf cas particuliers, la réduction du volume ne permet pas une réduction de la dose de produit (Perriot, 2012). Des expériences en laboratoire et en plein champs doivent être faites afin de dégager une ou des tendances générales pour, *in fine*, mettre en place des références techniques sur la méthode à diffuser auprès des agriculteurs.

1.4.2 La lutte génétique

Les variétés résistantes permettent de diminuer de 20 €/ha en moyenne l'investissement en fongicides (Jørgensen et al., 2008), comparativement à une variété sensible.

Mécanismes en jeu

Dans sa revue, Goodwin, (2007) rappelle ainsi le propos de Nelson et Marshall de 1990 : « en comparaison aux autres maladies du blé, comme les rouilles, peu de progrès ont été réalisés en matière de résistance variétale aux septorioses ». Malgré l'accélération significative des recherches, Goodwin inventorierait 12 gènes de résistance, dits Stb, en 2007. Même en tenant compte de la mise à jour de l'inventaire par Cuthbert, (2011) à laquelle on peut rajouter les travaux de Ghaffary et al. (2011 et 2012), 18 gènes Stb sont identifiés aujourd'hui, à comparer aux 73, 89, 61 et 95 pour la rouille jaune, rouille brune, rouille noire et oïdium, respectivement (Ghaffary et al., 2011). La plupart des résistances du blé à la septoriose qui ont pu être étudiées sont des résistances dites spécifiques. Cette résistance est pratiquement totale, oligogénique, et gouvernée par une relation gène-pour-gène (Brading et al., 2002). Mais il existe d'autres mécanismes en jeu. La résistance partielle (quantitative) peut agir en réduisant d'autres composantes du cycle épidémique : efficacité d'infection, période de latence, taille des lésions nécrotiques/sporulantes, quantité de spores produites par lésion, induction de la sénescence, capacité de restauration et vitesse d'épuisement des pycnides (Cowger et al., 2002, Gough, 1978, Viljanen-Rollinson et al., 2005, Lovell et al., 2004). Enfin, les variétés peuvent avoir des capacités d'échappement variées, certaines réussissant à réduire la quantité de spores arrivant au niveau des étages foliaires les plus hauts (Arraiano et al., 2009). Ceci a entre autre été mis en évidence concernant la hauteur des plantes (Eyal, 1987).

Nombreux sont les auteurs qui affirment l'influence de l'architecture sur le développement de la maladie bien qu'il n'y ait pas de gènes de résistance impliqués. Par exemple, Ando et al. insistent sur la modification de l'architecture pour réduire le contact hôte-pathogène, créer des barrières contre le développement épidémique ou bien favoriser un microclimat qui limiterait la maladie (Ando et al., 2007). Certains leviers d'action reposent sur la modification de la hauteur de la talle, la vitesse de développement des phyllochrones, l'angle et position des feuilles, la position de l'épi, et les zones de chevauchement du feuillage.

Bahat note une relation entre la proximité des étages foliaires et le développement de la maladie (Bahat, 1980). Les travaux de Lovell montrent que le développement de la maladie est influencé par la distance entre l'emplacement de l'inoculum et les feuilles

émergentes (Lovell et al., 2004). Ses travaux démontrent que si la hauteur d'émergence des feuilles est très basse, cela augmente le risque d'infection y compris pour une longue période de chevauchement entre la dernière feuille sortie infectée et celle en émergence. D'autres travaux insistent sur la vitesse de développement du phyllochrone. Du fait de la longue période de latence du pathogène, les nouvelles feuilles auraient le temps de croître et de s'éloigner de l'inoculum porté par les feuilles situées plus bas (Shaw et Royle, 1986). Par exemple, les parcelles les plus tardives peuvent avoir une montaison plus rapide et ainsi voir leur risque épidémique réduit (Lovell et al., 1997 et Shaw et Royle, 1993).

Conclure à propos de l'architecture est souvent difficile. Dans d'autres travaux, Lovell utilise une même variété ayant reçu deux doses différentes d'azote (N) créant ainsi un cultivar dense (riche en N) et un autre moins dense (pauvre en N). Si le couvert est peu dense, on a plus de chance d'observer un transfert de spores étant donné que les gouttes d'eau atteignent plus facilement les feuilles du bas portant les pycnidiospores : on parle « d'effet parapluie ». Cependant, dans cette expérience la sévérité finale est plus forte sur la modalité riche en N, et les auteurs ont pu observer que les plantes de cette modalité portaient plus de spores (Lovell et al., 1997).

Pour le moment, les connaissances ne sont pas suffisamment opérationnelles pour préconiser quels traits du couvert il est préférable de moduler pour réduire la maladie. L'architecture se trouve donc dans un réseau complexe où les interactions avec l'épidémie et les traitements fongicides sont nombreuses.

Les deux pistes innovantes pour lutter contre les épidémies de septoriose discutées auparavant sont de deux natures différentes, d'abord la géométrie des couverts puis la technique de pulvérisation. Ces deux paramètres interagissent à un moment précis du cycle cultural : au moment de l'interception de la bouillie par les feuilles lors de l'application fongicide.

2 Etude des interactions entre traitement fongicide et couvert végétal par la mesure de l'interception foliaire

2.1 Propriétés physiques et chimiques de l'interface feuille-solution-air

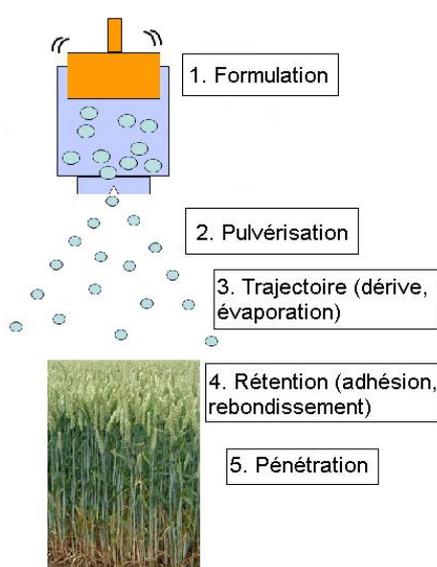


Figure 5: Les facteurs impliqués dans le transport des matières actives

La Figure 5 distingue cinq étapes concernant le devenir de la solution fongicide lors de la pulvérisation. D'abord la formulation puis la pulvérisation suivie de la trajectoire et de la rétention pour finalement s'arrêter à la pénétration. Au cours de la trajectoire, des pertes peuvent avoir lieu par dérive et évaporation tandis que pendant la rétention, c'est le rebondissement qui génère des pertes. A l'interface solide-liquide-gaz, deux forces majeures s'opposent. La tension superficielle qui vise à maintenir l'intégralité de la goutte et l'énergie cinétique. Quand une goutte entre en contact avec une surface, l'énergie cinétique provoque l'étalement de la goutte ce qui augmente la surface de contact du fluide et donc les forces de frictions. Si une couche d'air se trouve présente entre la surface et la goutte d'eau, la tension superficielle prend le dessus ce qui est à l'origine du rebondissement (Spillman, 1984 et Gauvrit, 1996).

Afin de garantir une meilleure rétention, il est possible de réduire la tension surfacique en apportant des adjuvants « mouillants ».

2.2 Efficacité d'impact : interaction entre la taille des gouttes et l'architecture du couvert

Les grosses gouttes sont régies par les lois gravitaires et les petites gouttes par les lois aérodynamiques (Spillman, 1982). Ainsi, leur trajectoire diffère, les premières iront verticalement et les deuxièmes se déplaceront à l'horizontale (Bache, 1985 et Spillman, 1984). Cette différence est importante lorsqu'il s'agit de considérer l'orientation de l'obstacle soit celle de la feuille. En effet, les petites gouttes interceptent facilement les canopées à port vertical tandis que les grosses gouttes parviendront facilement aux supports horizontaux. Cependant, concernant la rétention, d'autres facteurs à échelle microscopique sont à prendre en compte sur la surface de la feuille.

2.3 Influence de l'épiderme des feuilles sur la rétention

La rétention dépend en partie de la rugosité de la feuille, elle-même étroitement liée à la présence ou absence de cristaux de cire sur la cuticule. Chaque espèce, et parfois même, le stade de développement d'une espèce se caractérise par la propriété mouillable ou peu mouillable de ses feuilles (Gauvrit, 1996). Les plantes dites mouillables sont recouvertes de cires amorphes qui forment des surfaces « lisses » ce qui favorise l'étalement des gouttes pulvérisées sur les feuilles et augmente la surface de contact entre le produit et la feuille (**Annexe II**). Dans ce cas particulier, il n'est pas nécessaire d'utiliser un adjuvant (Bonin et Gautellier-Vizioz, 2012). Les plantes peu mouillables ont une cuticule particulière. Cette dernière est constituée de cires cristallines qui limitent la rétention jusqu'à 1/10 par rapport aux feuilles « lisses » et empêchent l'étalement des gouttes (**Annexe II**). Les graminées dont le blé, sont considérées comme peu mouillables mais la constitution de leur cires évolue au cours du temps jusqu'au point où certains auteurs qualifient cette plante de mouillable après le stade montaison (Bonin et Gautellier-Vizioz, 2012).

Si une feuille est mouillable qu'elle soit horizontale ou inclinée (45°) la rétention sera la même (Wirth et al., 1991). Cependant, dans le cas d'une feuille inclinée, il est probable que la taille des gouttes joue un rôle important. En effet, si les gouttes sont de grande taille, les forces de gravité sont plus importantes facilitant ainsi l'écoulement.

Pour conclure, les traits caractéristiques de l'espèce influencent la rétention des gouttelettes par le biais de la structure épicuticulaire de la feuille et donc des cires qui la constituent. C'est donc au niveau du contact de la goutte sur la surface foliaire que de nombreuses interactions ont lieu.

2.4 Interaction entre le produit phytosanitaire et l'architecture

Les travaux combinant architecture, traitement fongicide et développement de la septoriose sont peu nombreux. De plus, les résultats sont peu concluants car de nombreux facteurs de variation interviennent notamment l'espèce, le stade phénologique, l'état physique de la matière active et la technique d'application.

En agronomie, l'étude du dépôt sur les feuilles est compliquée car nombreux sont les facteurs qui influencent le dépôt et la rétention du produit. Les études montrent l'existence de forts taux de variation du dépôt en fonction des espèces. Dans des expériences sur *Pteridium aquilinum* (Grande Fougère), Richardson démontre qu'au sein de la canopée la rétention augmente lorsque le volume pulvérisé diminue (Richardson et al., 1986). Dans une autre étude, Bryant et Courshee font varier les volumes d'application sur céréales (50, 100 et 200 l/ha) sans pour autant observer des différences significatives sur les quantités de dépôt (Bryant et Courshee, 1985).

La modélisation permettrait de standardiser la variation des mesures faites en plein champs d'où l'intérêt de concevoir un modèle d'interception foliaire. Ce dernier doit prendre en compte l'architecture du couvert bien que très peu la considèrent (Bache, 1985). Plusieurs modèles ont été mis en place comme celui de Grayson et al. en 1991, ou encore Richardson et Newton en 2000. Cependant, chaque modèle semble être spécifique à une technique d'application ou à un type de plante donné (espèce et/ou orientation des feuilles).

Aujourd'hui, les échanges entre la canopée et le traitement via les mesures d'interception foliaire sont encore méconnus de même que les processus affectant les échanges du produit avec le sol et l'atmosphère. Les dépôts sont influencés par de nombreux facteurs dont la surface et l'angle des feuilles, la densité de la canopée, les mouvements de la rampe et la trajectoire des gouttes.

3 Etude des interactions multiples par des modèles architecturés : insertion de ce travail dans le projet de recherche ECHAP

Une méthode pour prendre en compte la complexité du système champignon-peuplement-fongicide est la modélisation. Il est ainsi possible de manipuler quantitativement différents paramètres de l'architecture d'un couvert pour en étudier les effets sur l'épidémie, toutes choses étant égales par ailleurs. Ceci peut permettre de hiérarchiser l'importance des différents mécanismes. Dans le cas de la septoriose, l'UMR EGC de l'INRA Grignon a développé le modèle Septo3D. Ce modèle établi par Robert et al., 2008, naît de l'association d'un modèle de plante en 3D dit ADEL blé (Fournier et al., 2003) et d'un modèle dynamique d'épidémie de septoriose inspiré des travaux de Rappilly et Jolivet (1976). Le modèle a été créé pour simuler le développement de l'épidémie en tenant compte des interactions et donc en incluant trois effets de la structure du couvert sur celui-ci : la densité (modulant le contact de l'eau contaminée avec la feuille), la quantité de surface foliaire (substrat du pathogène) et les distances entre les organes (pour la propagation de la maladie). Il doit permettre d'identifier et de hiérarchiser en détail les traits de structure du couvert qui jouent sur le développement épidémique.

Les premiers résultats de hiérarchisation soulignent d'abord l'importance du phyllochrone, puis, l'effet moyen de la longueur des feuilles et finalement un faible effet de la vitesse d'élongation de la tige ainsi qu'un effet nul de sa hauteur (Robert et al., 2008 et 2009). Néanmoins, ce modèle n'intègre pas, aujourd'hui, l'interaction avec les fongicides, que ce soit leur interception par le couvert, leur efficacité sur l'épidémie ou leur devenir dans l'environnement. Ceci limite la possibilité de s'appuyer sur le modèle pour concevoir des stratégies de lutte innovantes mobilisant l'ensemble des techniques évoquées ci-dessous. Répondre à ces limites est justement l'objectif du projet ECHAP, un projet de trois ans ayant débuté en 2010 et visant à « Réduire l'utilisation des fongicides en associant stratégies de traitements optimales et couverts ECHAPpants aux maladies ». Ce projet vise à développer un outil de modélisation créé par l'assemblage de plusieurs modèles dont Septo3D dans le but ultime de proposer des stratégies fongicides plus adaptées. Un volet expérimental a été intégré à ce projet (INRA UMR EGC, 2011) : celui-ci a pour objectifs de fournir des données permettant aux modélisateurs du projet de construire et/ou d'évaluer leurs modèles. En effet, l'évaluation des modèles architecturés est une tâche complexe.

Réduire l'apport de produits phytosanitaires c'est réfléchir à des systèmes de culture où la maladie est mieux maîtrisée avec moins de traitements. Les efforts de recherche se concentrent dans l'élaboration et la combinaison de techniques innovantes afin d'augmenter les résultats d'efficacité biologique. Il ne s'agit pas d'éradiquer la maladie mais de la contrôler par divers mécanismes dont des stratégies fongicides adaptées au couvert cultivé. La Figure 6 met en relation les divers facteurs qui influencent le développement épidémique. Nombreuses sont les interactions entre ces facteurs d'où l'intérêt potentiel d'un modèle complexe permettant de prendre en compte ces éléments.

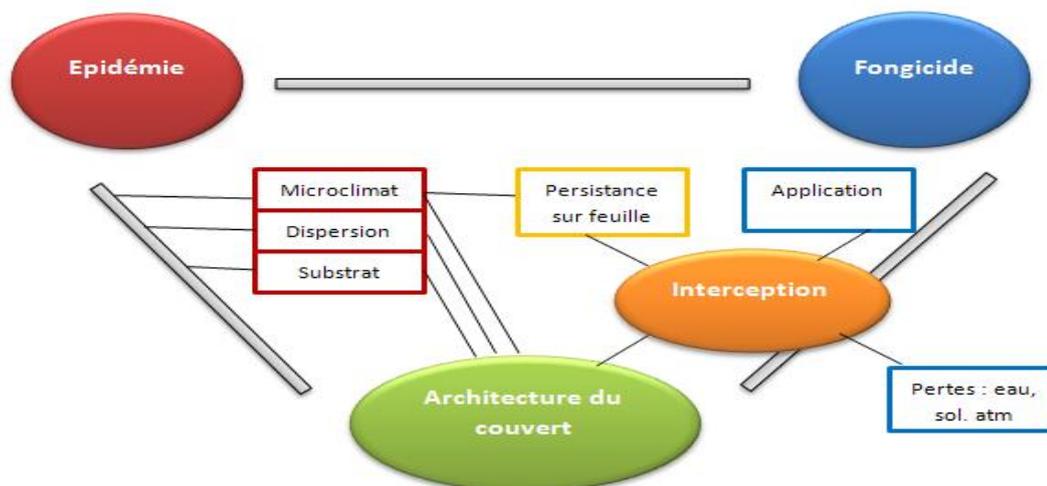


Figure 6: Schéma récapitulatif des interactions multiples

La branche Architecture-Interception-Fongicide nous intéresse particulièrement.

Il s'agit de comprendre comment l'architecture du couvert de blé et la technique de pulvérisation à bas volume peuvent influencer le développement de *Septoria tritici*?

Cette problématique soulève une multitude de questions auxquelles ce stage vise à répondre :

- De quelle façon la canopée intercepte-t-elle le traitement ?
- Le volume de bouillie influence-t-il le dépôt de fongicide sur la plante ?
- Peut-on, en jouant sur les différents leviers, réduire la dose de fongicide sans pour autant diminuer l'efficacité du traitement ?

Chapitre 1 : Etude des applications fongicides réalisées dans l'essai

1 Matériels et Méthode

1.1 Matériel végétal

Pendant les deux premières saisons culturales du projet ECHAP, différentes architectures de blé ont été mises en place afin d'étudier leur comportement vis-à-vis de l'échappement à *S. tritici*. Dans un premier temps, il s'agissait de comparer des variétés avec des hauteurs de talles différentes. Pour cette occasion, l'institut technique ADAS (UK) a créé deux variétés, une naine et l'autre demi-naine appelées respectivement Rht3 et Mercia. Ces dernières étant identiques à l'exception d'un seul gène contrôlant la hauteur de la talle et nommé Rht-B1c.

La deuxième année d'étude a visé à comparer des variétés qui différaient en nombre de talles soit une variété monotalle et une autre polytalle. Cependant, les températures hivernales trop basses ont entraîné le gel et donc la destruction de ces variétés sensibles au froid. L'essai a donc porté sur une variété commerciale demi-naine nommée Trémie qui a la particularité d'être sensible à la maladie de septoriose. L'enjeu de cette manipulation est donc légèrement différent puisqu'il ne s'agit plus de comparer des architectures différentes. Nos efforts de recherche se sont concentrés sur les techniques d'application du traitement.

1.2 Traitements fongicides

Cette expérience vise à comparer la technique du bas volume aux techniques conventionnelles appliquées sur du blé contre la septoriose. En parallèle, on cherche à raisonner la dose appliquée sans pour autant modifier l'efficacité biologique.

Les traitements ont lieu au stade 2N soit GSZ 32 (13/04/2012) et/ou au stade DFE soit GSZ 39 (11/05/2012) (**Annexe I**). La spécialité commerciale est Opus® (125 g/l d'époxyconazole) dont la dose homologuée est 1l/ha. La plupart des traitements appliqués par les agriculteurs sont fractionnés en deux applications c'est pourquoi cela représente la majorité des traitements étudiés dans cette manipulation. Cependant, nous avons voulu tester également l'effet d'un seul traitement qui aurait lieu à un des deux stades choisis.

Le dispositif expérimental est le même pour les deux années mais le nombre de variétés diffère. L'expérience de 2012 porte sur une seule variété, ce qui a permis de tester certaines doses de produit plus faibles qui n'avaient pas été testées en 2011. Le protocole détaillé est celui de l'année 2011-2012 étant donné que l'expérience 2010-2011 a été peu déterminante du fait de la faible pression en septoriose. Le détail du dispositif de 2011 se trouve en **Annexe III**. Les résultats des deux campagnes sont néanmoins confrontés lors de la discussion.

1.2.1 Dispositif expérimental 2011-2012

Il s'agit d'un dispositif comportant trois blocs randomisés contenant chacun 10 combinaisons de modalités des facteurs étudiés. Chaque parcelle expérimentale mesure 3m (l) x 8m (L). Un espace de 1,5 m de large toutes les deux parcelles expérimentales consécutives est mis en place afin de permettre le passage du quad lors des applications fongicides (rampe déportée à droite) (dispositif expérimental présenté en **Annexe IV**).

Il s'agit de déterminer l'influence du volume de bouillie et de la dose de produit sur l'efficacité biologique du traitement et sur les composantes du rendement. L'objectif est d'obtenir une comparaison relative entre traitements. Les modalités ainsi que les traitements (combinaison des niveaux de facteurs étudiés) sont résumés dans les Tableaux 2 et 3.

Tableau 2: Modalités étudiées lors de la campagne 2011-2012

Le volume de bouillie:	La dose	Date de traitement
- 200 l/ha - 150 l/ha - 80 l/ha - 40 l/ha	- 0.25 l/ha - 0.5 l/ha - 1 l/ha	- T1 +T2 stades 2N et DFE - T1 : 2N - T2 : DFE

Le dispositif possède néanmoins une originalité : toutes les combinaisons de facteurs ne sont pas représentées sur les blocs. En effet, ils sont constitués de dix parcelles élémentaires ce qui limite le nombre de traitements. Pour la dose 0,5 l/ha, notre choix a porté sur la présence des modalités les plus extrêmes soit les plus grands volumes ainsi que les plus bas, excluant ainsi le volume moyen de 80 l/ha. Parmi les combinaisons dose-volume nous avons donc retiré le traitement : volume 80 l/ha à dose 0,5 l/ha.

Tableau 3: Combinaisons des modalités de tous les facteurs étudiés en 2011-2012

Traitement	Application fongicide	Dose par application (l/ha)	Volume (l/ha)
1	0	0	0
2	Référence : T1+T2	0.5	200
3	T1	1	200
4	T2	1	200
5	T1+T2	0.25	200
6	T1+T2	0.25	150
7	T1+T2	0.25	80
8	T1+T2	0.25	40
9	T1+T2	0.5	150
10	T1+T2	0.5	40

1.2.2 Matériel de pulvérisation

Une station météorologique est placée sur l'essai afin d'évaluer précisément les conditions d'application des produits. Celles-ci sont précisées en **Annexe V**.

L'application de fongicide à bas volume est délicate dans la mesure où la probabilité d'obtenir des petites gouttes est plus importante ce qui augmente le risque de dérive. Afin de limiter les pertes, le choix a été celui d'utiliser des buses basse pression à 110° permettant une faible hauteur de rampe à 50 cm de la cible.

Le volume de bouillie (en l/ha) se calcule, à un coefficient près, comme le produit entre le débit de bouillie à la rampe (l/min) et l'inverse de la vitesse (km/h).

$$\text{volume épandu} = 600 \times \frac{\text{Débit de bouillie à la rampe}}{\text{largeur de travail} \times \text{vitesse}}$$

Ainsi, plus le volume est faible plus la vitesse est importante ce qui exige un matériel particulier. La rampe de pulvérisation à air comprimé a donc été montée sur un quad afin d'atteindre les vitesses requises lors d'une application en bas volume. Cette dernière, placée à droite du quad, mesure 3 m et comporte six buses espacées de 50 cm (**Annexe V**).

Le débit détermine le calibre de la buse et la pression (Figure 7). Or, un maximum de paramètres doivent être fixés sur la technique d'application afin de limiter les biais d'expérimentation. Nous avons donc fixé la pression à 1.5 bars quel que soit le volume. Les autres facteurs doivent également être fixés. D'une part, il s'agit de déterminer le calibre des buses en fonction du volume souhaité et d'autre part la vitesse d'avancement du quad. Les vitesses et calibres utilisés sont issus des recommandations de la marque Teejet qui sont présentées en **Annexe VI**. Le Tableau 4 résume le matériel utilisé pour chaque traitement sur l'année 2012. Le matériel employé en 2011 était le même à l'exception de la dernière buse qui était de couleur bleue et utilisée à la vitesse de 5.1 km/h (pour la modalité à 200 l/ha).

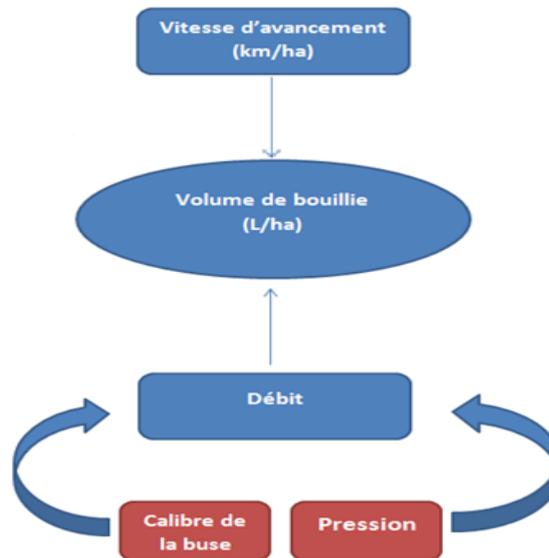


Figure 7: Schéma présentant les facteurs affectant le volume de bouillie

Tableau 4: Matériel de pulvérisation et conditions d'application (2011-2012)

Volume (l/ha)	Débit buse (l/min)	Buse	Couleur	Pression (bars)	Vitesse (km/h)
40	0.42	XR 110 015	Verte	1.5	12.5
80	0.36	XR 110 020	Jaune	1.5	8.4
150	0.83	XR 110 030	Bleu	1.5	6.7
200	1.12	XR 110 040	Rouge	1.5	6.7

1.3 Evaluation de la maladie de septoriose

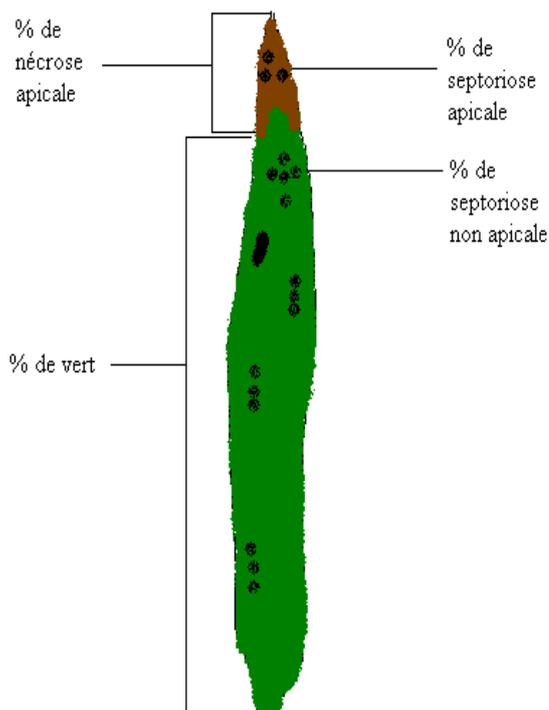


Figure 8: Protocole notation maladie sur feuille de blé

Il s'agit de suivre le développement de *Septoria tritici* sur les plantes par étage foliaires. Deux études se distinguent, d'abord un suivi fréquent pour caractériser la dynamique du cycle fongique puis une étude de l'efficacité biologique des différentes stratégies fongicides étudiées. Les mesures d'intensité de maladie ont été réalisées sur les étages foliaires non sénescents à la date de mesure.

Le développement épidémiologique a été suivi précisément. Les variables mesurées sont (Figure 8):

- % de vert par rapport à la surface totale.
- % de sénescence apicale par rapport à la surface totale.
- % de septoriose non apicale par rapport à la surface totale.
- % de septoriose par rapport à la surface en sénescence apicale (0 ; 25 ; 50 ; 75 ; 100).
- % autres attaques de bioagresseurs par rapport à la surface totale

Ainsi, il est possible de distinguer la sénescence naturelle de celle provoquée par la maladie. Cette distinction est particulièrement importante pour la validation des modèles architecturaux et épidémiologiques mais ces derniers ne seront pas détaillés dans le rapport.

Des mesures hebdomadaires ont été faites sur 10 plantes baguées par parcelle élémentaire et par bloc sur le témoin non traité et sur la parcelle référence soit le traitement 2 (Tableau 3) afin de pouvoir comparer la progression de la maladie. Pour tester l'efficacité biologique des traitements, deux mesures sur l'ensemble des modalités de l'essai ont été effectuées à 21 et 28 jours après le deuxième traitement (respectivement 31/05/2012 et 08/06/2012) sur 30 plantes par parcelle (mesures destructives) et par bloc. On mesure l'évolution de la maladie sur les quatre dernières feuilles.

1.4 Mesures physiologiques

L'objectif de la protection fongicide contre la septoriose étant la préservation du rendement, cette variable est mesurée pour toutes les modalités, avec une moissonneuse-batteuse d'expérimentation. La récolte est faite au milieu des parcelles pour éviter le biais des effets de bordure.

Les mesures effectuées en post récolte sont le PMG, et le calcul de l'humidité relative afin de normaliser le rendement à 15 % d'humidité.

Afin de recueillir un maximum d'informations sur le développement du couvert pour compléter le modèle architectural, diverses mesures ont été faites au cours de la saison : le nombre de plantes/m², le nombre de talles/m² ainsi que le nombre d'épis présents/m² et la surface moyenne des feuilles.

2 Résultats des applications fongicides contre la septoriose

2.1 Dynamique de développement de la maladie

L'AUDPC est une mesure quantitative permettant de comparer plusieurs dynamiques d'épidémie. Dans notre cas, cette mesure permet de comparer les traitements fongicides sur une même variété. La Figure 9 représente la dynamique de la maladie sur des plantes témoin non traitées et le traitement de référence. L'année 2012 se caractérise par une année riche en septoriose du fait des très nombreuses pluies au printemps. Cet aspect permet de justifier en partie les fortes attaques de maladies présentes sur Trémie. A cela se rajoute la faible résistance de cette variété à *S. tritici*. Classée parmi les plus sensibles, sa note est de 4/9 sur une échelle de 1 à 9 où 1 signifie très sensible et 9 résistante (source GEVES).

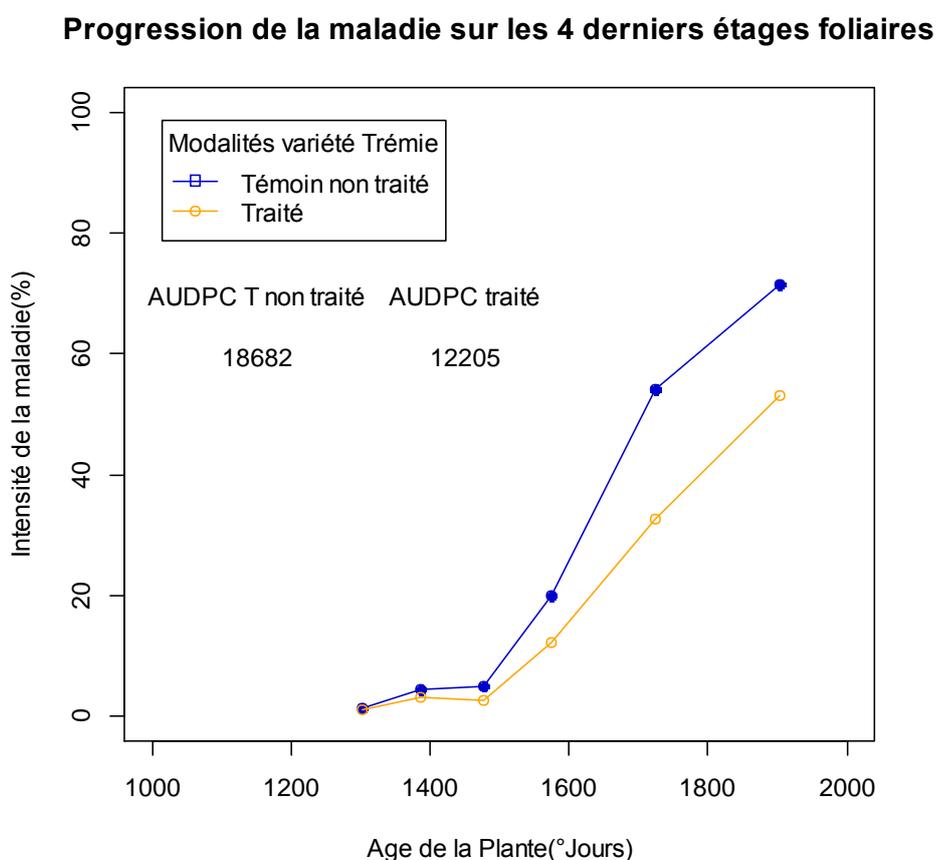


Figure 9: Dynamique de la maladie au cours du cycle cultural en 2012. Les correspondances entre date et degré jours correspondants sont présentées en Annexe VII.

L'intensité de la maladie est importante avec des attaques qui atteignent en moyenne 53% et 70% de la plante respectivement pour les parcelles traitées et non traitées. La dynamique est très similaire pour les deux traitements au début du cycle mais se distingue au cours du développement du couvert. Ces différences sont certainement dues au traitement fongicide qui a eu lieu le 12 Avril (1096 °J) puis le 10 Mai 2012 (1407,5 °J). Après les traitements, les courbes se séparent progressivement et la dynamique de l'épidémie devient plus lente pour les parcelles traitées. La pente de cette courbe est plus faible et se traduit également par un AUDPC moins important (12205 par rapport à 18682). Cette différence entre modalités est significative au seuil de 5 % avec une probabilité critique égale à 0.00425.

La septoriose est fortement dommageable si elle atteint les quatre dernières feuilles responsables du rendement. On s'intéresse par la suite au développement de la maladie sur les quatre derniers niveaux notés F1, F2, F3, F4 avec F1 la feuille de l'étage supérieur. Les courbes ne présentent que les données à partir desquelles les dernières quatre feuilles sont apparues. Le graphique débute au moment de l'application du second traitement (Figure 10). On montre que l'évolution de la maladie diffère en fonction du niveau et du traitement. Il est possible d'observer un gradient d'intensité décroissant lorsque l'on monte vers le sommet de la canopée. De plus, pour chaque niveau foliaire, les pentes sont plus importantes pour les parcelles non traitées que les parcelles traitées. Cependant les niveaux de maladie sont fortement marqués pour F3 quel que soit la modalité. On s'intéresse alors à la date d'apparition de F3 par rapport au moment des traitements. On observe que 41 plantes sur 60 possédaient déjà ce niveau foliaire entièrement ligulé lors du premier traitement. Bien qu'elles ne présentaient aucun symptôme il est fort probable que la contamination ait eu lieu avant : le traitement aurait donc été curatif pour F3 ce qui est moins efficace. Pour les étages supérieurs, on considère que le traitement a été préventif.

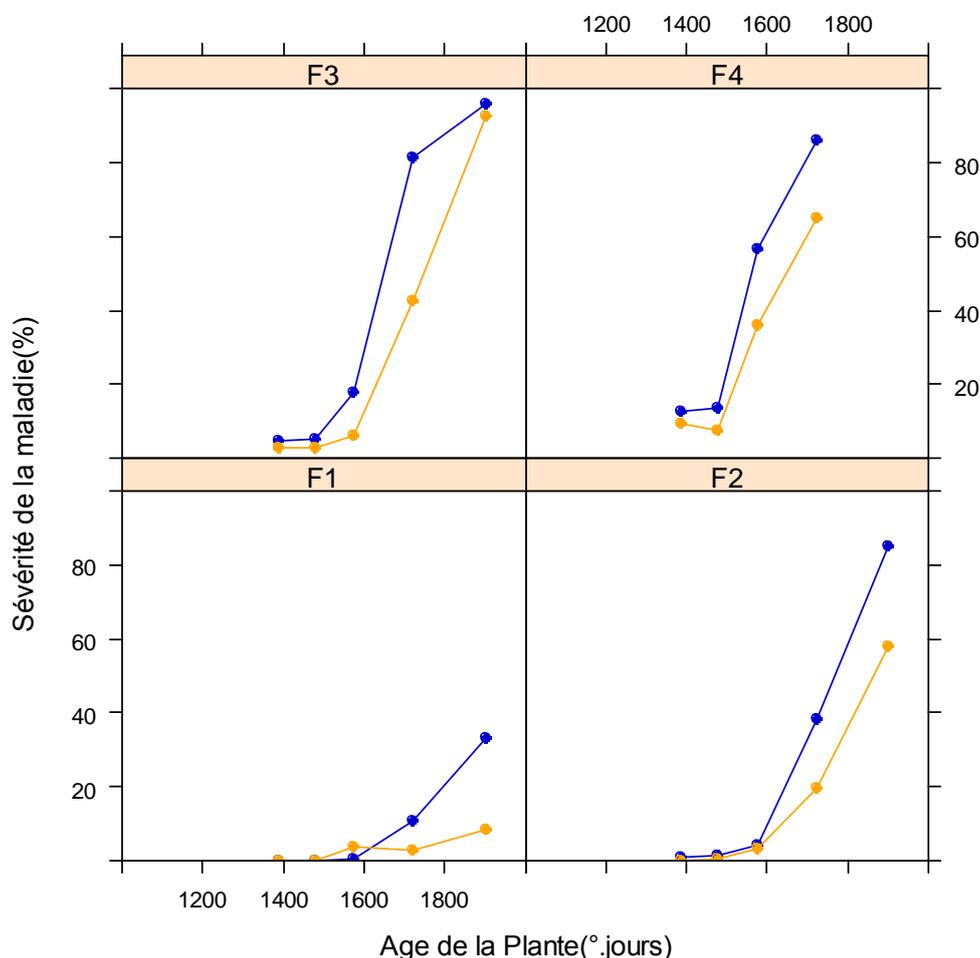


Figure 10: Progression de la maladie en 2012 sur les quatre derniers niveaux foliaires. En bleu le témoin non traité et en orange la référence (modalité 2). Les correspondances entre date et degré jours correspondants sont présentées en Annexe VII.

2.2 Influence des facteurs sur l'efficacité biologique

Les essais de l'année dernière (2010-2011) ne sont pas pris en compte étant donné le faible niveau de maladie. Nous présentons par la suite les essais de la campagne 2011-2012. Le graphique ci-dessous (Figure 11) présente les résultats obtenus. Les différences entre les doses sont importantes avec en moyenne une intensité de maladie supérieure de 6 % pour les plus faibles doses. Les résultats d'efficacité sont légèrement supérieurs pour les bas volumes avec en moyenne 5 % de plus par rapport au volume conventionnel (200 l/ha) mais les différences ne sont pas très marquées. Un traitement statistique est fait afin de mettre en évidence la significativité des différences observées sur l'ensemble du jeu de données.

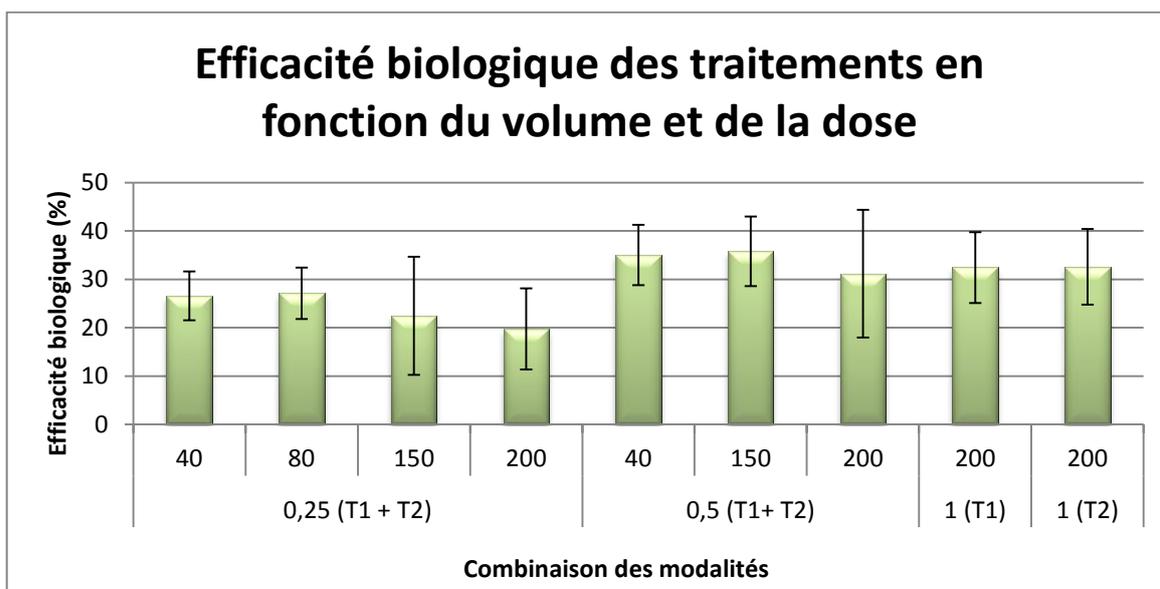


Figure 11: Efficacité biologique en fonction des traitements

Le choix du dispositif compromet l'analyse des résultats par une simple ANOVA. En effet, une combinaison de modalités est manquante et il est impossible de tester l'effet volume et l'effet dose par une analyse de variance à deux facteurs. Notre démarche a donc consisté à réaliser une analyse de variance à 1 facteur qui se présente comme la combinaison des facteurs dose et volume puis de créer des contrastes. Ces derniers sont des combinaisons linéaires de chaque traitement. Les contrastes permettent de maintenir l'intégralité des degrés de libertés (ddl) du jeu de données (soit ddl = 18) ce qui rend la méthode plus précise qu'une analyse de variance d'un sous ensemble du jeu de données où les degrés de libertés sont fortement réduits. Chaque contraste permet de répondre à une question cognitive de l'étude. On s'intéresse principalement à trois aspects :

- Y a-t-il un effet du volume sur l'efficacité biologique ?
- Y a-t-il un effet de la dose sur l'efficacité biologique ?
- Y a-t-il une interaction entre les facteurs dose et volume ?

Les lignes de commandes R ainsi que la méthode des contrastes sont détaillées en **Annexe VIII**. La variable à expliquer est l'intensité de maladie et non pas l'efficacité biologique car cela introduirait un biais supplémentaire créé par les valeurs de sévérité du témoin.

2.3 Distinction entre les différents traitements

L'ANOVA à un facteur prend également en compte un éventuel effet bloc. Les sorties du logiciel R montrent un effet significatif pour le facteur étudié (Tableau 5) :

Tableau 5: Résultats de l'ANOVA à 1 facteur

Facteur	Probabilité critique	Significativité
Combinaison dose-volume	1.86e-06	S
Bloc	1.06e-05	S

Les postulats de l'ANOVA sont vérifiés et validés sur les résidus (**Annexe IX**).

Le test de Newman-Keuls permet de comparer les modalités entre elles. Il en sort que l'ensemble des modalités se démarquent de la modalité témoin non traité (Zéro_0 sur la Figure 12) pour qui, l'attaque de septoriose est extrêmement sévère (60%).

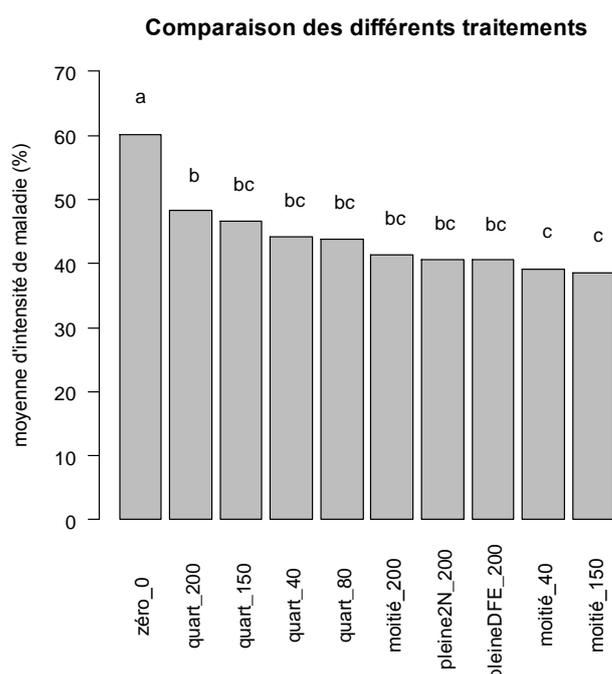


Figure 12: Classification en fonction des moyennes pour le facteur Dose_Volume

2.3.1 L'effet dose sur l'efficacité biologique

L'effet dose est testé en trois temps en fonction du volume étudié.

On teste d'abord l'écart entre la dose 0,5 l/ha et 0,25 l/ha pour le volume 200 l/ha. L'hypothèse H0 est telle que l'écart entre les deux modalités est nul. Il est testé à partir du test de Student qui fournit une probabilité critique de 0.0105. On conclut que l'effet dose est significatif pour le volume 200 l/ha. On procède de la même manière pour les volumes 150 l/ha et 40 l/ha. On obtient que tous les volumes testés répondent à un effet significatif de la dose. Le Tableau 6 présente l'ensemble des résultats.

Tableau 6: Résultats du test de Student pour les contrastes testant l'effet dose

Volume étudié (l/ha)	t observé	Probabilité critique (pc)	Significativité
200	-2.855	0.010	S
150	-3.337	0.004	S
40	-2.118	0.048	S

2.3.2 L'effet volume sur l'efficacité biologique

L'effet volume doit être testé pour les doses 0.25 l/ha puis pour 0.5 l/ha. Ces deux doses ont un nombre de traitements différents ce qui modifie les combinaisons linéaires. De plus, il est important de tester simultanément tous les volumes à une même dose mais il est aussi indispensable de respecter le critère d'équidistance entre les volumes.

Pour la dose 0.25 l/ha, les quatre volumes sont présents et il est possible de considérer que leur écart est équidistant. On intègre donc les quatre traitements dans une même combinaison linéaire. On suppose que, s'il y avait un effet significatif du volume, il se manifesterait par la présence d'un gradient en fonction du volume. On teste ainsi un contraste linéaire dont les coefficients sont : -3, -1, 1, 3 (méthode des contrastes en **Annexe VIII**).

Dans le cas de la dose 0.25 l/ha seul les volumes 40, 150, et 200 l/ha sont représentés. Ces derniers ne sont pas équidistants, on testera donc des combinaisons linéaires (CL) entre les traitements deux à deux. Soit : CL 200-CL150 ; CL150-CL 40 et CL 200-CL 40.

Les résultats sont résumés dans le Tableau 7:

Tableau 7: Résultats du test de Student pour les contrastes testant l'effet volume

Dose(l/ha)	t observé	Pc	Significativité
0.25	1.988	0.0622	NS
0.5	150-200 : -1.156	150-200 : 0.262	NS
	40-200 : -0.969	40-200 : 0.345	NS
	40-150 : 0.187	40-150 : 0.854	NS

On conclut qu'il n'y a pas d'effet volume. Jusqu'à 40 l/ha la réduction des volumes apparaît possible sans affecter l'efficacité de traitement.

2.3.3 Interaction Dose : Volume

L'interaction entre les facteurs peut être étudiée à partir des traitements dose_volume suivants: 0.25_40 ; 0.25_150 ; 0.25_200 ; 0.5_40 ; 0.5_150 et 0.5_200. Etant donné le nombre de traitements, faire une combinaison linéaire deviendrait compliqué. C'est pourquoi le choix a porté sur la réalisation d'une ANOVA à deux facteurs : dose et volume. Cette analyse de variance n'est pas très pénalisée étant donné que la résiduelle conserve 10 ddl par rapport aux 18 ddl qu'il y a en totalité. Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le Tableau 8 :

Tableau 8: Résultats du test de Student pour les contrastes testant l'interaction Dose: Volume

Facteur	Pc	Significativité
Dose	0.0121	S
Volume	0.5035	NS
Bloc	0.0135	S
Dose: Volume	0.8647	NS

Après validation des postulats il est possible d'affirmer que le volume ne dépend pas de la dose et vice versa d'où une interaction inexistante entre les facteurs.

2.4 Influence des facteurs sur le poids de mille grains

Dans cette partie nous avons testé par la même méthode décrite précédemment, l'effet de chaque variable sur le poids de mille grains (PMG). Dans cette étude (Figure 13 et Tableau 9) on retrouve les principales conclusions que le paragraphe 2.2 sur l'efficacité biologique. Le témoin se distingue de toutes les autres modalités, il possède 6,6 g de poids en moins par rapport au traitement de référence. D'autre part, aucune différence n'est observée entre les volumes mais on distingue les valeurs entre les doses.

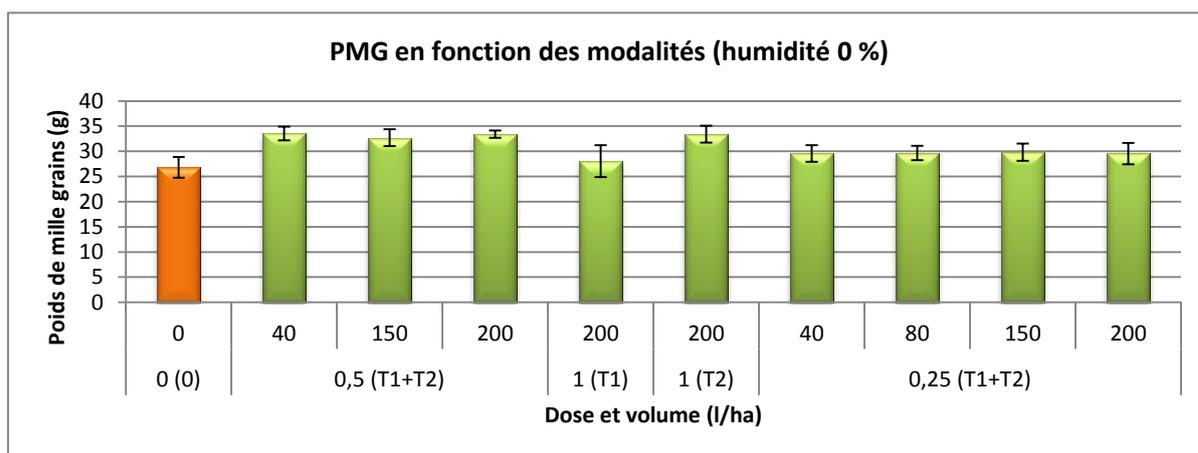


Figure 13: PMG en fonction du volume et de la dose

Tableau 9: Récapitulatif des contrastes et analyses de variances effectués sur la variable PMG

Contraste	Probabilité critique	Significativité
Effet Dose		
Volume 200 l/ha	2.426e-06	S
Volume 150 l/ha	9.064e-05	S
Volume 40 l/ha	1.559e-06	S
Effet Volume		
Dose 0.25 l/ha	0.941	NS
Dose 0.5 l/ha		NS
- 200-150	0.222	
- 150-40	0.150	
- 200-40	0.816	
Effet date de traitement		
T1 à 2N- T1 à DFE	2.264e-08	S
Interaction		
Dose : Volume	0.698	NS

D'autres résultats sont légèrement différents : Le traitement unique à 2N semble moins efficace et se distingue du traitement unique à DFE soulignant ainsi l'importance de la

date du traitement. Ce phénomène ne fut pas observé lorsqu'il s'agissait de considérer l'efficacité biologique entre traitements.

2.5 Influence des facteurs sur le rendement

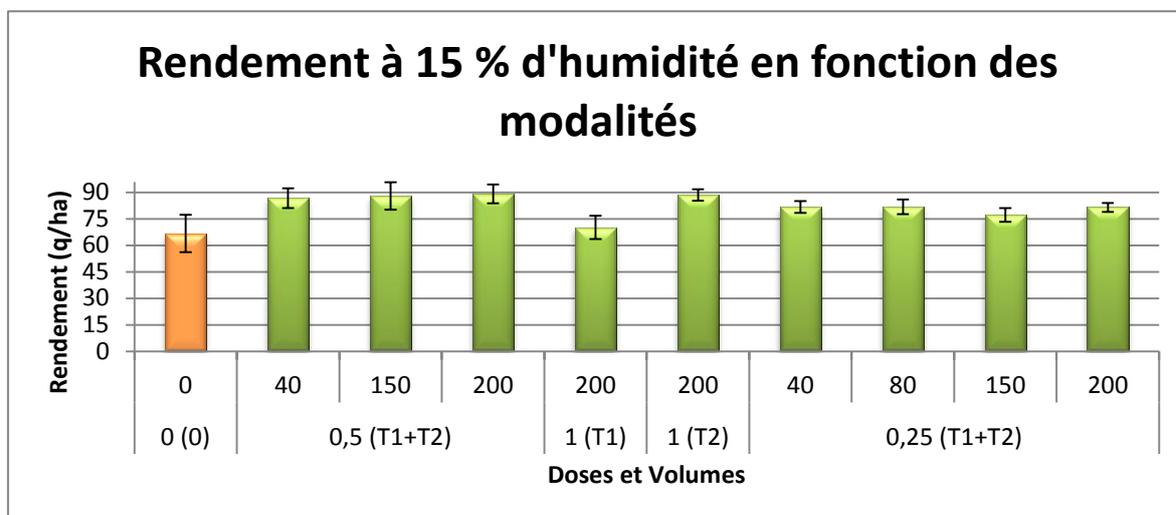


Figure 14: Rendement en (q/ha) en fonction du volume et de la dose

Les rendements obtenus oscillent entre 66,7 q/ha pour le témoin et 89,2 q/ha pour la modalité référence (Figure 14). La nuisibilité maximale observée entre le témoin non traité et la modalité de référence affecte de 25 % du rendement soit 22,5 q/ha.

Bien que moins marqués, les résultats sur le rendement sont concordants avec ceux de l'efficacité biologique et du PMG. Les analyses statistiques confirment l'absence d'un effet volume. De même, la date du traitement diminue de 21 % le rendement lorsque la parcelle est traitée tôt dans le cycle cultural. Le graphique en **Annexe X** classe les traitements en fonction des doses. Or, la méthode des contrastes fournit des résultats quelque peu différents. En effet, deux des trois combinaisons linéaires pour tester l'effet dose sont significatives. Le Tableau 10, ci-dessous, présente les résultats de chaque test.

Tableau 10: Récapitulatif des contrastes et analyses de variances effectués sur la variable rendement

Contraste	Probabilité critique	Significativité
Effet Dose		
Volume 200 l/ha	0.05540891	S
Volume 150 l/ha	0.01013293	S
Volume 40 l/ha	0.2066446	NS
Effet Volume		
Dose 0.25 l/ha	0.6462615	NS
Dose 0.5 l/ha		NS
- 200-150	0.7509648	
- 150-40	0.7365787	
- 200-40	0.5151664	
Effet date de traitement		
- T1 à 2N- T1 à DFE	0.0001134625	S
Interaction		
Dose : Volume	0.56541	NS

3 Discussion des applications fongicides contre la septoriose

3.1 Comparaison des résultats entre saisons

Le suivi de la dynamique a été fait à trois moments de la campagne 2010- 2011. D'abord, très tôt dans le cycle cultural, soit le 19 Novembre 2010 puis le 26 Mai et le 9 Juin 2011 respectivement à 279, 1517 et 1744 °Jours. Les graphiques sont présentés en **Annexe XI**. Etant donné que le pic de maladie est tardif, la 2^{ème} figure de l'**Annexe XI** détaille le développement de la maladie entre le 26 Mai et le 9 Juin 2011 pour les différents niveaux foliaires. L'intensité de la maladie est extrêmement faible dépassant à peine 10 % lorsqu'on considère la moyenne des quatre niveaux de la variété la plus sensible. Ces faibles valeurs sont étroitement liées au climat qui, pour la campagne 2010-2011, s'est caractérisé par de fortes périodes de sécheresse ne permettant pas ou très peu la propagation du champignon (Figure 15).

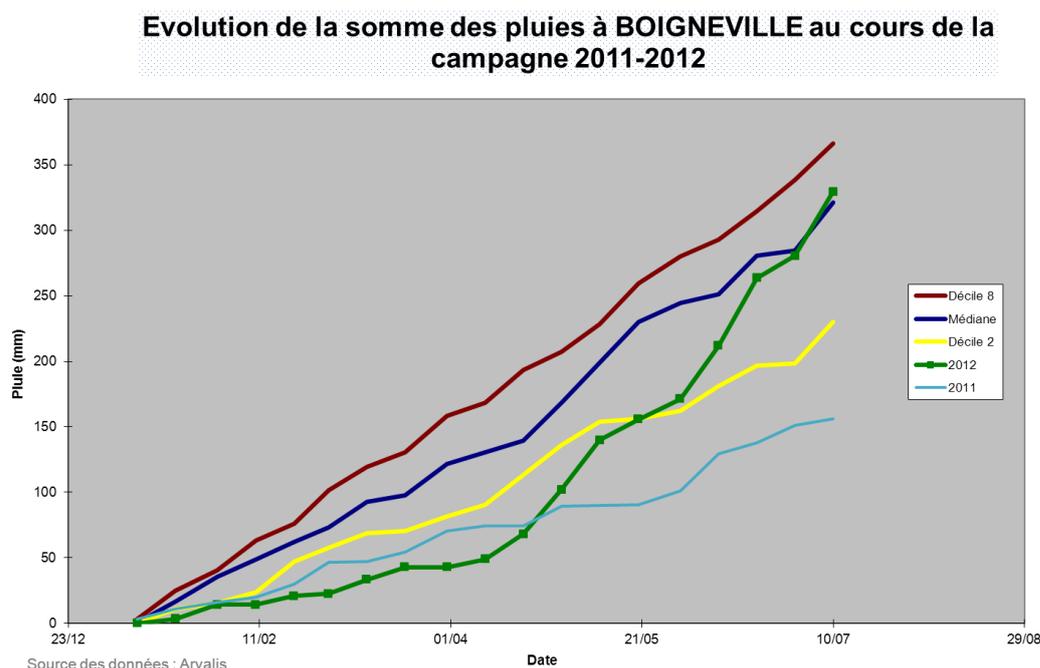


Figure 15: Evolution de la somme des pluies sur la station Arvalis-Institut du Végétal, Boigneville, campagnes 2010-2011 et 2011-2012. Les déciles et les médianes sont calculés sur 20 ans

Bien que le niveau de maladie soit faible, les deux variétés sont différemment affectées. La variété naine Rht3 se montre plus sensible aux attaques du champignon et ce, quel que soit le niveau foliaire. Les notations étant faites sur 30 plantes parmi lesquelles de nombreux maître-brins sont morts, ne permet pas de faire une analyse de variance suffisamment puissante. En analysant les écart-types on observe que ces derniers sont importants traduisant la forte hétérogénéité entre plantes saines et les différents niveaux de maladie présents. En tenant compte de ces écart-types il n'est pas possible de conclure sur des différences d'intensité de maladie entre Mercia et Rht3 ni entre les différents niveaux foliaires pour chacune des variétés.

L'année atypique de 2011 s'est caractérisée par une longue période de sécheresse ce qui a affecté la dynamique du champignon. L'apparition de symptômes a demeuré faible. De même pour les essais d'efficacité biologique le niveau de maladie est présent comme un bruit de fond et le témoin ne se distingue pas des autres modalités. Au contraire, l'année 2012 s'est distinguée par de fortes attaques de septoriose sur l'ensemble du territoire français (réseau d'observation des Bulletins de Santé du Végétal). La variété Trémie, sensible à *S. tritici*, s'est vue fortement affectée par ce champignon et cela, même en

présence de traitements fongicides. A la fin de la saison, le témoin suivi toutes les semaines est environ six fois plus atteint cette année par rapport à la campagne précédente avec des attaques qui atteignent en moyenne 70 % de la plante.

Le scénario pluviométrique de Mars à Mai 2012 a permis l'accumulation de 148,7 mm d'eau. Ce sont surtout les précipitations abondantes de la fin du mois d'Avril qui ont permis à la maladie de progresser sans interruption jusqu'à la dernière feuille (Figure 15). Le climat et la sensibilité de la variété mais aussi la part croissante des résistances aux triazoles ont été propices au développement de la maladie. Ceci s'est traduit par un faible niveau d'efficacité des traitements soit 35 %. A titre d'exemple, sur l'ensemble du territoire français et dans des années de faible pression maladie, l'efficacité des produits peut atteindre 53 % (cas de l'année 2011) et moins de 35 % en cas de forte pression (année 2005) (Arvalis - Institut du Végétal, 2005 et 2011) avec une tendance à la baisse du fait de l'apparition de souches résistantes.

On peut souligner que les réponses « rendement » obtenues avec le fongicide ont probablement été limitées d'une part par l'efficacité médiocre des traitements et d'autre part, par la forte sensibilité de la variété. L'écart de rendement entre témoin non traité et la référence est légèrement inférieure à 20 q/ha ce qui correspond à une pression de maladie un peu supérieure à la moyenne nationale.

Les résultats obtenus en efficacité se confirment par les mesures faites sur le PMG et le rendement. L'important niveau de maladie a permis de distinguer le témoin des autres modalités justifiant ainsi la lutte fongicide.

3.2 Les bas volumes sont aussi efficaces que les volumes de bouillie conventionnels.

Tous les volumes ont fourni un bon contrôle de la maladie. Bien que les faibles volumes se sont montrés plus efficaces, les différences n'ont pas été significatives. De plus, on remarque que la variabilité pour les volumes plus importants (150 l/ha et 200 l/ha) est élevée.

Les essais sur bas volume sont peu nombreux et concernent principalement l'usage des herbicides. Depuis 2004, Arvalis – Institut du Végétal a mis en place des essais herbicides systémiques sur blé tendre. Les résultats montrent que l'efficacité de l'application reste constante pour des volumes de 50 à 150 l/ha (Perriot et Denis, 2011b) soit la même tendance que celle que nous avons pu observer dans la manipulation fongicide.

Le volume étant indépendant des variables mesurées, nous avons donc compilé les différents résultats (Figures 16 et 17) :

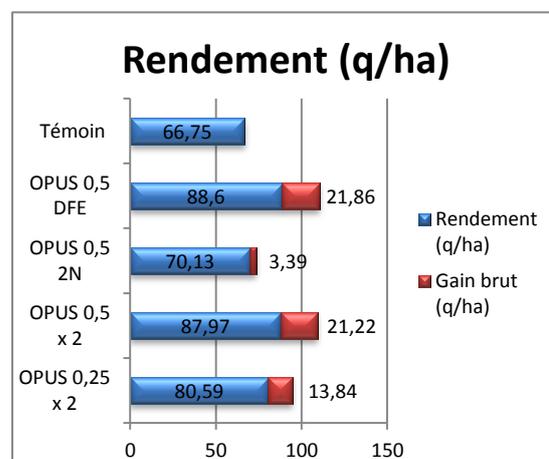
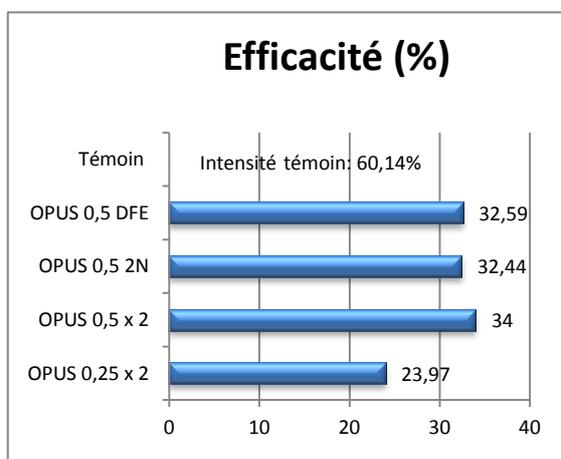


Figure 17: Efficacité biologique des traitements

Figure 16: Rendement des traitements

3.3 La date du traitement ne doit pas être négligée

Au volume de 200 l/ha, un seul traitement à demi-dose au stade jeune compromet le PMG ainsi que le rendement alors que cela n'affectait pas l'efficacité biologique. La différence de résultats entre ces deux variables pour ce qui relève de la date de traitement, met en évidence la complexité de l'essai. Nous avons remarqué qu'entre la première et deuxième mesure d'intensité de maladie celle-ci demeure stable entre les deux dates pour les parcelles traitées au stade DFE (respectivement 40 % et 41 %) alors que l'intensité double pour les parcelles traitées au stade 2N (passant de 24 % à 56 %). Nous pensons que ce phénomène a perturbé le remplissage et la maturation du grain. Par ailleurs, bien que le niveau moyen de septoriose soit de même intensité, il est possible que d'autres maladies se soient développées préférentiellement sur les parcelles ayant reçu un traitement très tôt facilitant ainsi leur développement par la suite. En effet, la fréquence ainsi que l'intensité des autres maladies et ravageurs est plus importante sur les parcelles ayant reçu le traitement au stade 2N mais cette différence n'est pas significative. Cependant, il est probable que l'apparition de plusieurs maladies simultanément affecte la migration des assimilés vers l'épi perturbant ainsi la qualité et le poids de ce dernier. Nous pouvons penser notamment à la rouille, la fusariose et le Léma, bioagresseurs également présents cette année.

3.4 Modifier la dose peut compromettre l'efficacité biologique et potentiellement la récolte

La limite de cette méthode expérimentale est que la pleine dose n'était pas représentée.

Les rendements et PMG obtenus à demi-dose sont satisfaisants sur le point de vue économique de la production et ne se distinguent pas des rendements obtenus précédemment sur ces parcelles. Cependant, diminuer de 75 % la dose peut entraîner des réductions significatives en efficacité biologique et en PMG.

Le travail de Perriot et Thierry (2011b) souligne le fait que le plus important pour pouvoir réduire les doses, est le respect des conditions d'application et non le volume d'eau. Ceci pourrait expliquer la grande variabilité des résultats obtenus en bas volume sur des essais de réduction des doses de fongicide et herbicide (Perriot et Denis 2011b, Ginkel et al., 1999 et Cross et Berrie, 1990).

En conclusion, la réduction des doses semble être influencée par une multitude de facteurs dont le degré d'intensité de la maladie et le mode d'action du produit phytosanitaire. Les résultats obtenus ici permettent de formuler l'hypothèse que la dose est plus importante que le volume lorsqu'il s'agit de maîtriser *S. tritici*. Ces conclusions sont valables pour des traitements fongicides sur d'autres maladies et espèces cultivées (Cross et Berrie, 1990) ainsi que sur des essais herbicides sur blé (Perriot et Denis, 2011a). Le succès de la réduction des doses et des volumes auprès des agriculteurs nécessite une surveillance accrue et une stratégie de traitement flexible. Plus d'essais doivent être menés en particulier sur les fongicides afin de valider ces propos.

Chapitre 2 : Mesure de l'interception foliaire

1 Matériels et méthode

1.1 Suivi du dépôt à partir d'un traceur

Cet essai vise à étudier la rétention du produit par la feuille à partir d'un traceur. G. Pergher a réalisé une étude de cinq traceurs fluorescents et sept traceurs non fluorescents pour conclure que la meilleure méthode serait l'étude de la tartrazine par colorimétrie (Pergher, 2001). En effet, ce colorant est stable vis-à-vis de la lumière, ne pénètre pas dans la plante et possède un taux d'extraction très proche de 100 % ce qui lui confère des propriétés intéressantes pour l'étude d'interception foliaire.

Ce colorant, utilisé en alimentation humaine sous le nom E102, est de couleur jaune. L'objectif de cet essai est de mimer une application fongicide en mélangeant la tartrazine à de l'eau. On obtient ainsi une « bouillie » de colorant qui sera pulvérisée à 200 l/ha, 150l/ha, 80 l/ha et 40 l/ha sur le même dispositif que le reste de l'essai (Matériels et méthodes du chapitre 1 et **Annexe IV** pour le dispositif). Le traitement au traceur concerne les parcelles élémentaires des blocs I et II. Cet essai est fait lors des deux années consécutives et le protocole d'application est identique à celui de la manipulation fongicide (variétés de blé, quad modifié, rampe déportée à droite et types de buse). Pour des raisons de sécurité et de manipulation du matériel végétal, il a été décidé de ne pas associer le colorant et le fongicide dans une même application. Le colorant est appliqué un jour avant le traitement fongicide successivement au stade 2N puis DFE. De plus, on suppose que l'humidité supplémentaire provoquée par l'application de colorant n'est pas suffisante pour influencer la maladie.

On étudie la rétention de produit sur les trois ou quatre dernières feuilles émergées du blé. De même, on évalue les pertes vers l'environnement à partir de cinq boîtes de Pétri déposées au sol et cinq autres en hauteur (sommet de la canopée) au milieu de la parcelle élémentaire. (photos de l'essai **Annexe XII**).

1.1.1 Extraction de Tartrazine

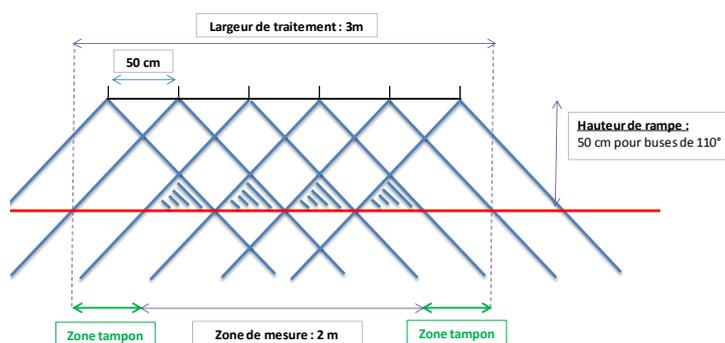


Figure 18: Zone de triple recouvrement créée par le jet de pulvérisation. En noir, la rampe et les six buses et en bleu les jets de pulvérisation et la zone de triple recouvrement hachurée. (Arvalis-Institut du Végétal)

Immédiatement après l'application, 10 plantes par parcelle élémentaire et par bloc sont prélevées aléatoirement sur les rangées du milieu pour bénéficier de la zone de triple recouvrement (zone hachurée Figure 18).

On recueille également les boîtes de Pétri. Les feuilles sont ensuite mises en solution dans un tube à essai contenant 10 ml d'eau. Les tubes sont secoués puis les feuilles sont retirées. La procédure est similaire pour les boîtes de Pétri où 10 ml d'eau sont déposés.

Les échantillons sont ensuite passés au spectrophotomètre calibré à la longueur d'onde de 430 nm. Le graphique de calibrage est présenté en **Annexe XIII**.

La courbe d'étalonnage établit une relation entre l'absorbance et la concentration de tartrazine selon l'équation :

$$A = a \times C$$

Où A est l'absorbance en unité arbitraire, C la concentration en mg/l et a , un coefficient spécifique d'absorption.

Pour obtenir une valeur de concentration l'absorbance doit être comprises entre 0 et 1.

1.1.2 Méthode de comparaison du dépôt

La dose du traceur est calculée de façon à obtenir une concentration convenable sur les échantillons dilués selon le protocole décrit précédemment. Pour faciliter l'analyse des calculs, il est préférable de fixer la concentration de tartrazine à la sortie du pulvérisateur. Dans les essais de 2010-2011 la dose de colorant à la sortie de la buse était de 240 mg/l quel que soit le volume. Etant donné les fortes dilutions qui ont dû être faites par la suite, il a été décidé de réduire cette concentration à 120 mg/l pour la saison 2011-2012. Cette modification de concentration n'engendre pas des différences considérables de la taille des gouttes (IRSTEA, 2011).

La « bouillie de colorant » est constituée d'une certaine quantité de colorant complétée avec de l'eau pour atteindre le volume souhaité. La concentration de tartrazine étant invariable à la sortie du pulvérisateur, cela implique des quantités initiales de colorant différentes en fonction du volume (Tableau 11). Afin de comparer les résultats entre volumes mais aussi entre années, on établit le rapport entre ce qui est retenu par les feuilles et ce qui est réellement appliqué soit le taux de récupération.

Tableau 11: Quantités appliquées en fonction des campagnes et des volumes

Volume (l/ha)	Quantité déposée (g) en 2010-2011	Quantité déposée (g) en 2011-2012
200	48000	30000
150	36000	22500
80	19200	12000
40	9600	6000

1.2 Elaboration d'un modèle explicatif

Ce modèle a permis de définir quelles sont les propriétés qu'il est indispensable de prendre en compte lors de l'interception d'un produit phytosanitaire par une canopée. Il s'agit de choisir un modèle permettant d'expliquer la variabilité du dépôt observée à un instant donné en identifiant les facteurs qui entrent en jeu.

Hypothèse de départ :

A partir de la loi de Beer-Lambert, nous avons formulé l'hypothèse que la proportion de produit parvenant au sol diminue de façon exponentielle lors de sa traversée dans la canopée. La loi de Beer-Lambert a d'abord été adaptée à l'interception lumineuse au sein d'une canopée. (Figure 19). La relation (1) s'écrit :

$$I = I_0 \cdot \exp -k \cdot L \cdot D \quad (1)$$

Avec :

k : le coefficient d'extinction du couvert

I/I_0 : la transmittance T du couvert, c'est-à-dire la proportion de lumière parvenant au sol

L : la longueur que le rayon traverse

D : la densité du couvert.

Cette relation peut se simplifier et on obtient alors : $I/I_0 = \exp(-k.LAI)$ (2)

Avec LAI l'indice de surface foliaire et k le coefficient d'extinction.

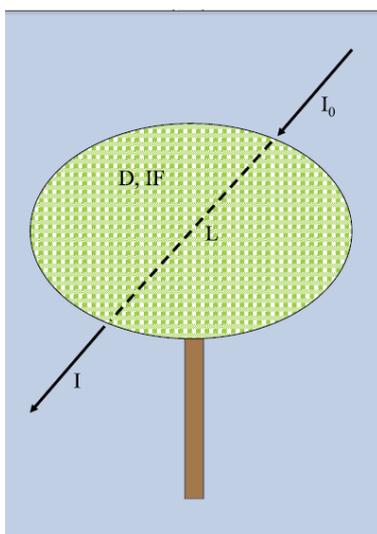


Figure 19: Schéma d'interception lumineuse sur la canopée. (Balandier et al., 2010)

Notre étude se base sur des quantités de colorant interceptées par le couvert que l'on a noté IF pour Interception au niveau Foliaire. En adaptant la formule (2) on obtient :

$$I_0 - IF = I_0 \exp(-k.LAI) \quad (3)$$

Cette expression peut être linéarisée afin de faciliter les traitements statistiques ce qui donne :

$$\ln(1 - IF/I_0) = -k.LAI \quad (4)$$

C'est cette formule qui sera utilisée pour l'élaboration du modèle.

Le modèle nécessite le calcul du LAI par étage foliaire. Pour cela, notre méthode consiste à déterminer les surfaces foliaires des quatre dernières feuilles émergées sur la plante ou à défaut les trois premières, sans inclure la tige. Pour la campagne 2010-2011, les surfaces foliaires ont été estimées à partir de la reconstruction fournie par la maquette 3D du modèle Septo3D. Pour la campagne

2011-2012, nous avons prélevé environ 20 échantillons de chaque niveau foliaire que nous avons analysé grâce au logiciel Image J. Par conversion entre pixels et mètres carrés, nous avons obtenu les surfaces moyennes pour chaque étage foliaire. Pour un niveau foliaire donné, le LAI est ensuite calculé en additionnant les surfaces foliaires du niveau étudié ainsi que celles des étages supérieurs et en multipliant le tout par le nombre d'épis au m² (**Annexe XIV**). Les valeurs de LAI sont également exploitées lors de l'interprétation des résultats d'interception foliaire.

2 Résultats des manipulations sur l'interception foliaire

L'objectif de cette étude est de :

1. Etudier la distribution du dépôt dans la canopée.
2. Comparer la rétention en fonction du volume de bouillie.
3. Identifier les déterminants biologiques à l'origine de la rétention.
4. Mettre en valeur une éventuelle relation entre la densité de la canopée et la rétention du produit.

Cette partie se limite aux expériences de la campagne 2011-2012 dont les résultats seront confrontés à ceux de l'année précédente dans la partie discussion.

2.1 Expérience préliminaire : étude de la cible biologique

Avant de présenter les résultats d'interception obtenus, il a semblé important de caractériser la surface étudiée soit la feuille de blé, et de vérifier par une expérience de contrôle que la méthode d'extraction du colorant est bien adaptée au support utilisé.

Le taux de récupération se calcule par le rapport entre le dépôt de colorant mesuré et la quantité appliquée. Plusieurs facteurs sont susceptibles de faire varier ce taux notamment la dégradation du traceur, la présence et nature des dépôts de fond comme les résidus de produits phytosanitaires et les pigments naturels ainsi que le processus d'extraction en soit. Il est donc important de prendre en compte le processus d'extraction qui lui, dépend des propriétés du colorant et du support étudié. On parlera alors de taux d'extraction. Ce que nous mesurons est en réalité le taux d'extraction et non pas le taux de récupération.

Dans une étude préliminaire, nous avons souhaité évaluer le taux d'extraction et par conséquent l'éventuel effet des dépôts de fond. Or, le taux d'extraction de la tartrazine sur une surface plastique est supposé être équivalent à 100 % (Pergher, 2001). Nous ne testerons donc pas le taux d'extraction sur les boîtes de Pétri.

Expérience sur les feuilles de blé :

L'expérience utilise des feuilles de blé non traitées à la tartrazine que l'on laisse tremper dans 10 ml de solution d'eau. 3 ml sont prélevés par la suite et passés au spectrophotomètre. Les échantillons donnent des valeurs positives d'absorbance à 430 nm. L'absorbance de ces feuilles non traitées correspond à des valeurs entre 2.4 et 24 µg (ou 0.24 et 24,0 mg/l) de tartrazine pouvant ainsi modifier entre 0.43 % et 4.30 % les résultats d'interception foliaire. Ces valeurs sont estimées trop faibles pour devoir les prendre en compte d'où on considèrera que le taux d'extraction est de 100 %.

2.2 Bilan de masse

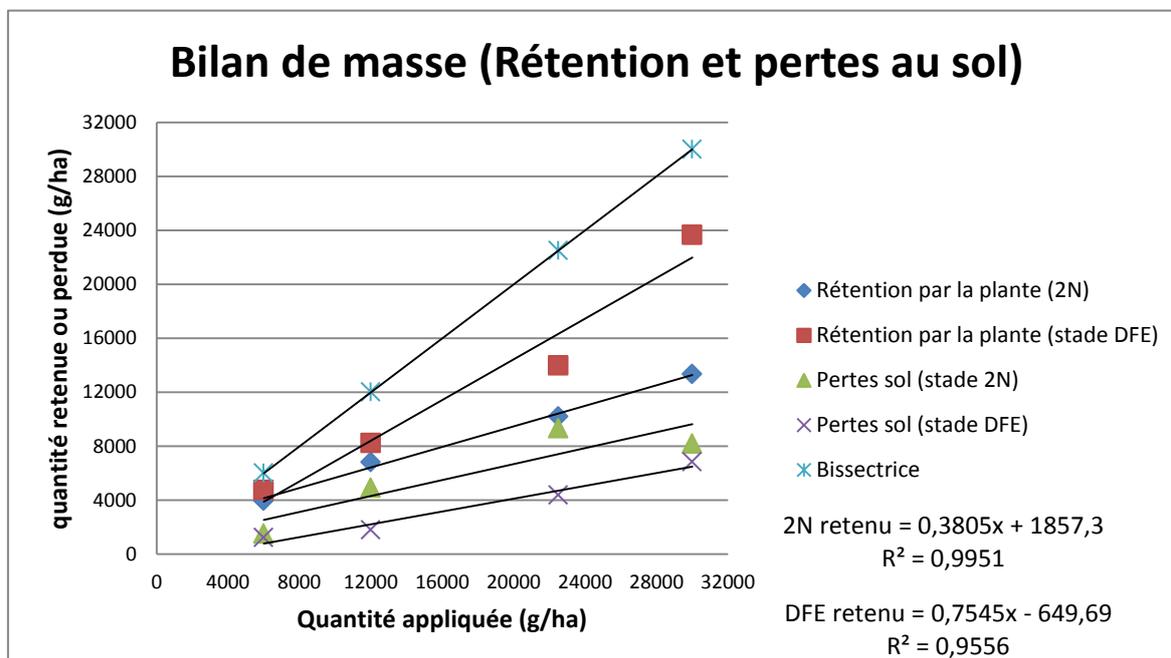


Figure 20: Bilan des entrées et sorties de traceur par rapport au référentiel couvert végétal

Le graphique (Figure 20) montre la répartition du produit après application. Le faible nombre d'échantillons collectés au sol et en hauteur, ne permettrait en aucun cas d'être représentatif de la réalité. Nous utiliserons donc ces valeurs pour corroborer les informations recueillies sur le feuillage. Comme espéré, la quantité de traceur retenue augmente avec la quantité pulvérisée et devient plus importante au stade de forte densité

foliaire, soit DFE, par rapport au stade 2N. Ces résultats sont confirmés par les courbes des pertes au sol. En effet, si la plante retient plus au stade DFE cela se traduit également par moins de pertes au sol pour ce même stade.

En moyenne et quel que soit le volume, au stade 2N les plantes de la variété Trémie interceptent efficacement 53 % du produit et 34 % se perd par écoulement vers le sol. Dans le cas d'un couvert plus développé (stade DFE) la rétention atteint en moyenne 72% tandis que les pertes diminuent à 19 % (**Annexe XV** pour les détails).

L'étude des résultats de cette partie porte sur une analyse descriptive des graphiques ou tableaux et s'appuie également sur une analyse statistique faite à partir du logiciel R. Il nous a paru important de séparer l'étude en considérant d'abord la totalité du traceur retenu sur les feuilles sur un hectare puis, de regarder plus en détail le dépôt par unité de surface de feuille pour chaque niveau foliaire.

2.3 Etude de la quantité totale de traceur déposée en fonction de la dose appliquée

Le dispositif mis en place permet de contrôler l'hétérogénéité continue du milieu expérimental et d'améliorer la précision des résultats. Il est à noter que ce type de dispositif ne permet de prendre en compte qu'un unique gradient d'hétérogénéité.

On étudie l'effet bloc afin d'enlever la part de variation due à une éventuelle hétérogénéité continue. On s'intéresse également à l'effet du volume et du stade phénologique, ainsi qu'à l'interaction entre ces deux facteurs. Pour cela, on réalisera une ANOVA à partir des données afin de dégager la significativité éventuelle des facteurs énoncés précédemment.

Les stades végétatifs se distinguent significativement par leur dépôt différentiel. De même, le dépôt varie en fonction du volume de bouillie pulvérisé. Le Tableau 12 ci-dessous présente les probabilités statistiques obtenues par l'analyse de variance et les sorties R sont présentées en **Annexe XVI**.

Tableau 12: Résultats de l'analyse de variance à deux facteurs (Stade et Volume)

Facteurs	Probabilité critique	Significativité au seuil de 5%
Stade	0.0002	S
Volume	0.0181	S
Bloc	0.6726	NS
Interaction Volume : Stade	0.1187	NS

L'analyse de variance est validée par la vérification des postulats soit l'indépendance, la normalité et l'égalité des variances des résidus à l'aide de tests graphiques et du test de Bartlett. (**Annexe XVII**).

On s'intéresse par la suite à la comparaison des modalités des facteurs significatifs. Pour la variété Trémie, le stade DFE retient globalement plus de produit que le stade 2N.

Le test de Tukey suggère une séparation des quatre modalités de la variable volume en deux groupes isolant la modalité ultra bas volume (40 l/ha) dans un groupe unique (Figure 21).

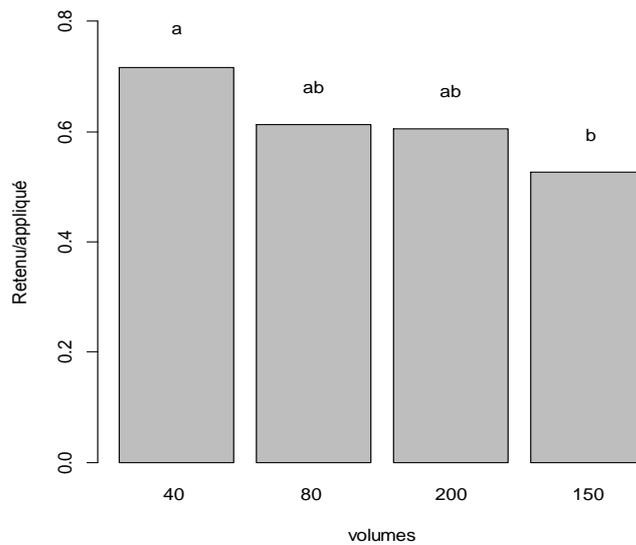


Figure 21: Comparaison des moyennes pour le facteur Volume

Pour confirmer qu'il y a un effet du volume sur le dépôt il faudrait observer un gradient entre les volumes. Le graphique montre qu'il y a un gradient décroissant lorsque le volume de bouillie croit bien qu'il semblerait qu'une inversion ait eu lieu entre les volumes 200 l/ha et 150 l/ha. Ce résultat suggère que le dépôt a été soit particulièrement faible à 150 l/ha soit anormalement important à 200 l/ha. Ce penchant (gradient décroissant) est confirmé par le graphique suivant qui montre aussi que deux valeurs de la modalité 200l/ha sont extrêmement élevées par rapport à la tendance décroissante (cercle en rouge Figure 22). Au stade DFE le dépôt à 200 l/ha augmente fortement ce qui se traduit par un pic sur les graphiques (Figures 22 et 23) alors que la tendance serait plutôt à la baisse. Le fait que l'interaction stade volume ne sorte pas significative confirme le fait qu'il s'agit bien d'une anomalie ponctuelle. Les arguments permettant de ne pas considérer ces points sont détaillés dans la discussion.

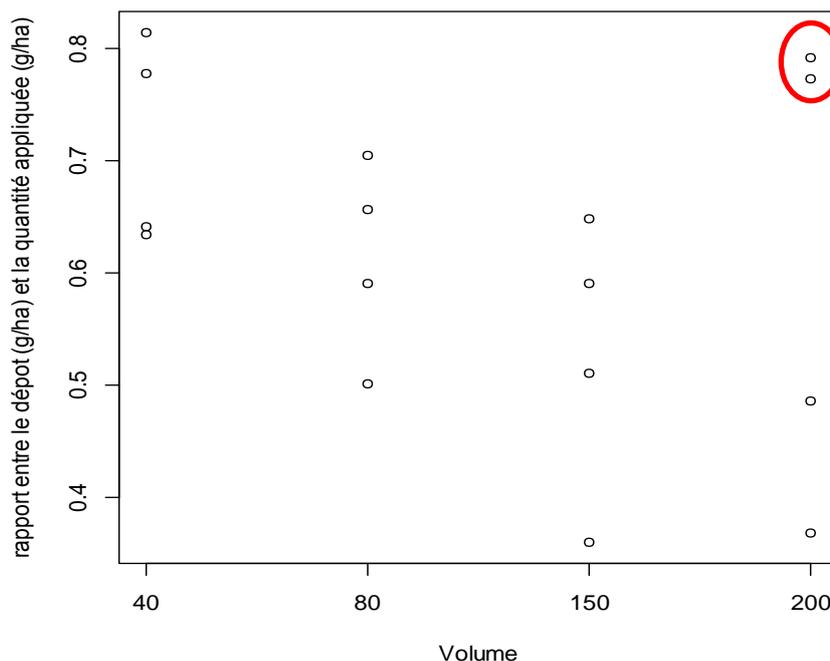


Figure 22: Relation entre le dépôt et le volume. Valeurs pour les deux blocs aux deux stades

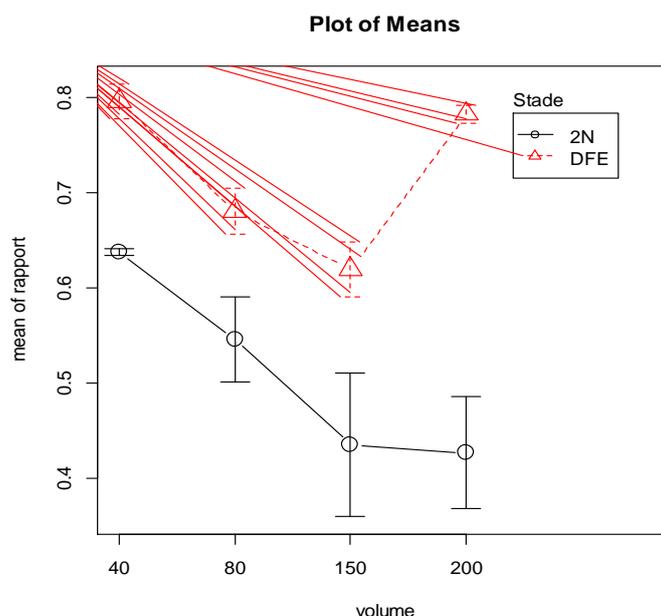


Figure 23: Relation entre la rétention et le volume en fonction des stades

2.4 Quantité déposée par unité de surface

Dans cette partie, il s'agit d'étudier le profil de répartition du spectre dans la plante. Pour cela la rétention est détaillée par étage foliaire : F1, F2, F3, F4 et Tige (T) et par unité de surface foliaire. Pour cela on divise la quantité retenue par la surface de contact correspondant au niveau. La valeur obtenue est divisée par la quantité appliquée afin de pouvoir comparer les données. Les résultats sont présentés Figure 24 et Tableau 13.

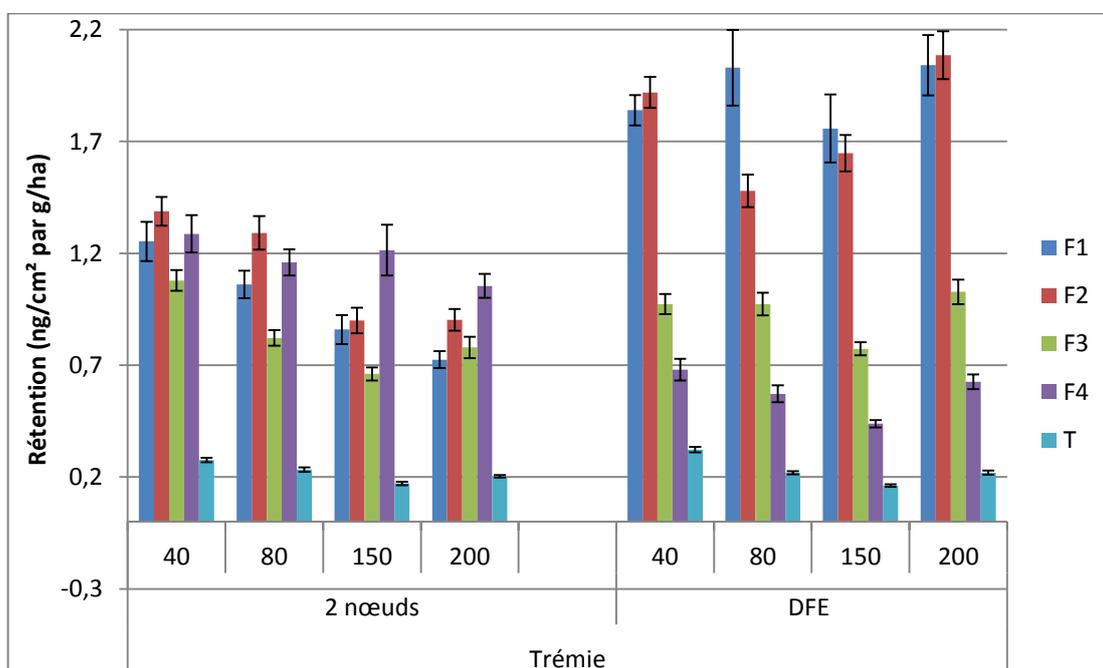


Figure 24: Quantité déposée en ng/cm² de feuille par g/ha de colorant appliqué à la parcelle élémentaire

Le graphique ci-dessus permet de distinguer la rétention en fonction des stades et des niveaux foliaires. Les différences entre volumes sont moins apparentes surtout au stade DFE. De plus, plus les valeurs sont élevées, plus les écart-types sont importants montrant ainsi une forte variation des résultats.

Tableau 13: Résultats de l'ANOVA à trois facteurs: stade, volume, niveau foliaire

Facteurs	Probabilité critique	Significativité au seuil de 5%
Stade	0.0002	S
volume	0.0002	S
niveau	< 2e-16	S
bloc	0.1946	NS
Stade:volume	0.0701	NS
Stade:niveau	6.83e-12	S
volume:niveau	0.9989	NS
Stade:volume:niveau	0.8121	NS

Les sorties R ainsi que la validation des postulats sont présentées respectivement en **Annexe XVIII** et **Annexe XIX**.

Les résultats statistiques et les classements sont semblables à ceux de la partie précédente (paragraphe 2.3) pour les facteurs stade et volume. Le gradient décroissant en fonction du volume est facilement vérifié pour le stade 2N. Dans le cas du stade DFE, il est moins évident bien que l'effet volume soit significatif. Au stade DFE et à V = 200 l/ha, il y a un dépôt plus important sur F2 par rapport aux autres volumes, au même stade.

De plus, la forme du profil de répartition entre volumes est identique pour un stade donné ce qui est confirmé par l'absence de significativité de l'interaction entre le volume et le niveau foliaire.

Finalement, l'accent est porté sur la rétention des différents niveaux foliaires qui eux, dépendent du stade. Dans la mesure où l'interaction entre ces facteurs est significative, on examine les effets du niveau foliaire pour chaque stade et inversement. Les sorties R sont résumées en **Annexe XX**.

La différence de rétention entre les stades se traduit par plus de dépôt sur les niveaux F1, F2 et moins sur F4 au stade DFE. Pour les niveaux F3 et T le dépôt demeure invariable. Au stade 2N quatre groupes se distinguent: les niveaux F4 et F2 absorbent considérablement plus de traceur constituant ainsi le groupe 1. On distingue par la suite F1 (groupe2), F3 (groupe 3) et la Tige (groupe 4). Au stade DFE, la rétention suit un gradient croissant en fonction de la hauteur d'insertion des feuilles. Il en ressort par ordre croissant de rétention :

Groupe 1 : F1 et F2 > Groupe 2 : F3 > Groupe 3 : F4 > Groupe 4 : T

En conclusion, la relation entre les dépôts et les différents facteurs montre que :

- ⇒ La plante intercepte plus à DFE qu'à 2N.
- ⇒ Le spectre de répartition de produit entre les niveaux foliaires dépend de l'âge de la plante.
- ⇒ On observe un effet volume qui est principalement marqué au stade jeune (2N) et qui se traduit par un gradient décroissant en fonction des valeurs croissantes du volume de bouillie.
- ⇒ Pour chaque stade, le profil de répartition entre les volumes est identique.

2.5 Modèle interception foliaire

2.5.1 Choix des modèles de régression

L'étude de la forme des données brutes semble indiquer que la forme de la courbe est exponentielle auquel cas l'hypothèse issue de la loi de Beer-Lambert peut être appliquée.

Nous étudions différents modèles de régression linéaire obtenus à partir du logiciel statistique R.

Dans un premier temps il s'agit de comparer des modèles dit emboîtés *i.e.* dont le premier est un sous-ensemble du second dans l'espace des variables et que l'on nommera modèle simple et modèle complet.

Le modèle simple fournit une relation entre le logarithme de la fraction de traceur qui traverse entièrement la canopée et le LAI. Il prend en compte toutes les données sans distinguer ni le volume, ni le stade ni la variété. Ceci suppose que l'effet de chacun de ces facteurs est faible.

Les modèles complets permettent de fractionner cette même relation en fonction d'un ou plusieurs facteurs. Ainsi on établit le modèle complet qui fournit une courbe par variété (noté modèle complet/variété), une courbe par volume (modèle complet/volume) ou bien une courbe par volume et par variété soit le modèle complet/Volume/Variété. On considère de même, des modèles complets qui prennent en compte les autres combinaisons de ces trois facteurs.

Les modèles sont obtenus à partir de régressions linéaires et la comparaison entre le modèle simple et les modèles complets a été faite par des analyses de variance (Tableau 14). Les équations de chaque modèle sont résumées en **Annexe XXI**.

Par raisonnement de l'hypothèse, si le LAI est nul alors l'interception s'annule également. D'un point de vue mathématique, il serait intéressant d'introduire le point (0,0) mais il ne faut pas que ce dernier modifie fortement le modèle. De nouveaux modèles incluant l'ordonné à l'origine nulle ont été créés et testés en parallèle (Tableau 14).

2.5.2 Présentation des résultats

Tableau 14: Comparaison des modèles emboîtés

Modèles	Probabilité critique pour le modèle avec ordonnée à l'origine	Probabilité critique pour le modèle sans ordonnée à l'origine	Significativité
simple, complet/variété	< 2.2e-16	< 2.2e-16	S
simple, complet/volume	0.5312	0.5422	NS
simple, complet/stade	0.9527	0.9091	NS
simple, complet/Variété/Stade	< 2.2e-16	< 2.2e-16	S
simple, complet/Variété/Volume	2.185e-14	5.093e-15	S
simple, complet/Volume/Stade	0.6278	0.6429	NS
simple, complet/Volume/Stade/variété	< 2.2e-16	< 2.2e-16	S

Plusieurs modèles complets se distinguent du modèle simple en fournissant plus de précision. Nous avons donc comparé les modèles complets entre eux à partir de la méthode de l'AIC. On classe les valeurs AIC des modèles de la façon suivante :

complet/volume/stade/variété < complet/variété/stade < complet/variété < complet/stade

Le modèle choisi est celui comportant la plus faible valeur soit complet/volume/stade/variété.

Le classement est strictement identique en considérant l'ordonnée à l'origine nulle. On conclut que le meilleur modèle est celui qui distingue l'interception en fonction de la variété, du volume et du stade. De plus, rajouter le point (0,0) permet d'obtenir des résultats plus satisfaisants. En effet, l'ajustement sur les points est visiblement meilleur, on choisit donc le modèle sans ordonnée à l'origine dont l'équation est présentée en **Annexe XXI**. Ce modèle représente 99 % de la variabilité mesurée.

Les graphiques ci-dessous présentent les droites de régression linéaires fournies par le modèle choisi (Figures 25 et 26). On remarque qu'elles s'ajustent bien aux valeurs mesurées. En **Annexe XXII** sont présentés les graphiques des valeurs prédites en fonction de celles mesurées pour chaque variété, stade et volume.

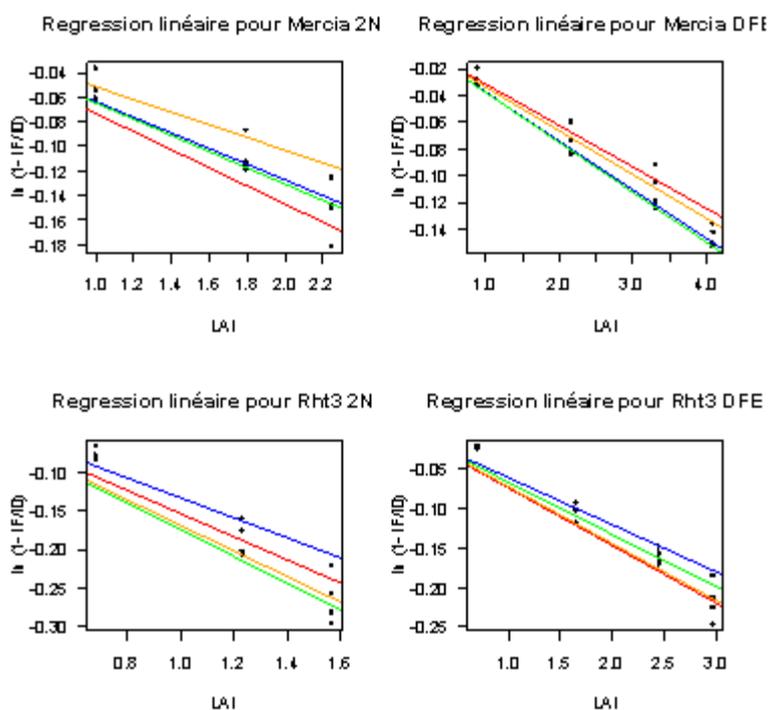


Figure 25: Régression linéaire pour Mercia et Rht3 aux stades 2N et DFE. En rouge : 40 I/ha, bleu : 80 I/ha, vert : 150 I/ha et orange : 200 I/ha.

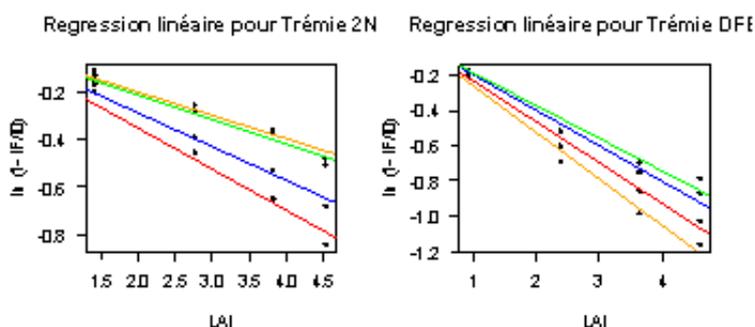


Figure 26: Régression linéaire pour Trémie aux stades 2N et DFE.

3 Discussion de l'expérience sur l'interception foliaire

La préoccupation environnementale de plus en plus grande, souligne le besoin croissant de connaître précisément l'endroit où atterrit le produit phytosanitaire. Ceci fait du dépôt parvenant au sol et de celui déposé sur la canopée, des paramètres importants pour l'évaluation des pratiques.

3.1 Plus de produit déposé au stade DFE qu'au stade 2N

La quantité totale de traceur collecté est supérieure au stade DFE par rapport au stade 2N, respectivement 72 % et 53 %. Ces quantités correspondent aux moyennes européennes (Linders et al., 2000). Pour les expliquer, la première hypothèse serait d'attribuer cet effet à l'augmentation de la densité foliaire. Or, en considérant uniquement la surface des quatre dernières feuilles, la différence de LAI entre stades est minime passant de 4,55 à 4,62 (**Annexe XIV**). Cette observation écarte notre hypothèse de départ.

D'autre part, cela ne serait pas dû à une superposition des colorants issus du premier puis du deuxième traitement (respectivement stade 2N et DFE) étant donné les fortes pluies qui ont eu lieu entre temps et le lessivage qu'elles ont provoqué.

La surface des plantes est un facteur important pour réguler l'interaction plante-environnement. En particulier, lorsqu'il s'agit de considérer la rétention et la pénétration d'un produit phytosanitaire. Cependant très peu d'informations existent au sujet de l'interaction entre la surface des feuilles et les pathogènes ou bien les traitements. Quelques travaux démontrent l'implication des cires épicuticulaires dans la résistance aux bioagresseurs et dans le contact avec des substances (Lowe et al., 1985). Ce comportement des cires définit la propriété de mouillabilité de la surface de contact et se traduit par l'angle de contact formé entre un solide et une substance. L'angle de contact du blé est en moyenne de 130° (Gauvrit, 1996) ce qui traduit le caractère de faible mouillabilité de cette graminée. Nous pensons que ce sont les cires qui pourraient être à l'origine des principales différences observées entre les deux stades étudiés. En effet, des travaux de Troughton et Hall montrent que la forme des cires des feuilles de blé dépend de l'âge de la plante et de son environnement donnant aussi bien des bâtonnets comme des plaquettes (**Annexe XXIII**). Ces différences seraient à l'origine du dépôt différentiel entre les stades pour une même variété (Troughton et Hall, 1967). Ainsi, dans le cas de Trémie, le différentiel de mouillabilité pourrait expliquer les variations de rétention de produit entre les deux stades. Il semblerait qu'au stade 2N, la plante soit nettement moins mouillable qu'au stade DFE. De plus, les mesures de dépôt par niveau foliaire montrent que ce sont les F1 et F2 qui retiennent considérablement plus de colorant au stade DFE. En effet, Au stade 2N les quantités retenues dans les différents étages de la canopée sont comparables tandis qu'au stade DFE plus de 54 % du total déposé (en mg) est assuré par la section supérieure de la canopée soit F1 et F2. Ce différentiel de rétention entre les stades va dans le même sens que les travaux de Miller et al., 2000. Ceci suggère des changements sur la structure de la canopée et/ou des changements de taille permettant de retenir plus. Mais les valeurs de dépôt par unité de surface permettent de trancher entre ces deux hypothèses en ne validant que la première. Certes, la densité foliaire pour le couple (F1 + F2) évolue entre les stades mais celle-ci diminue lorsque la plante vieillit (**Annexe XIV**) ce qui écarte la deuxième suggestion. (Rappelons que les feuilles au stade 2N sont différentes des feuilles au stade DFE ce qui explique les variations de LAI).

Une autre hypothèse valable porte sur la différence de géométrie de la canopée entre les deux stades. Sachant qu'il s'agit d'une plante peu mouillable, l'orientation des feuilles et leur agencement dans l'espace jouent un rôle important dans l'adhésion (Wirth et al., 1991 et Massinon et al., 2012). C'est pourquoi nous avons voulu mesurer le diamètre maximal de recouvrement des plantes pour chaque stade. Les résultats indiquent en

moyenne 12 cm pour le stade DFE et 9 cm pour 2N. Les photos en **Annexe XXIV** sont des exemples d'architecture foliaire qui ont servi à valider cette hypothèse.

Les différences observées entre les deux stades suggèrent qu'il est possible d'améliorer la technique d'application en l'adaptant au stade phénologique de l'espèce. Cette approche requiert cependant une méthode efficace pour estimer la structure de la canopée et la technique de pulvérisation adéquate. Le modèle d'architecture prévu dans le cadre de ce projet pourra être implémenté dans ce but afin de proposer des stratégies de lutte adaptées.

3.2 Evolution du spectre de rétention

En considérant le différentiel de mouillabilité énoncé précédemment, il est possible de formuler de nouvelles hypothèses sur la répartition du traceur entre les différents niveaux foliaires.

3.2.1 Distribution du dépôt au stade 2 nœuds

Étant donné l'hypothèse de faible mouillabilité de la plante à ce stade, l'orientation joue un rôle capital sur la rétention. Plus la feuille est verticale, moins elle aura de chances de retenir le produit (Wirth et al., 1991). Or, parmi toutes les feuilles, c'est la F1 qui est la plus verticale et qui présente donc plus de risques d'écoulement. Ce dernier favorise en outre, l'étage foliaire sous-jacent qui retient une partie et transmet du produit par rebondissement aux niveaux inférieurs. F2 ayant un port nettement planophile, elle retiendra majoritairement plus de produit. De même, cette hypothèse explique pourquoi F4 reçoit des quantités importantes de produit.

3.2.2 Distribution du dépôt au stade dernière feuille étalée

Lors du passage au stade DFE plusieurs changements ont lieu du point de vue de la répartition du produit au sein de la plante. L'étude du dépôt par unité de surface montre que le dépôt reste significativement invariable pour la tige et F3, augmente pour F1, F2, mais diminue pour F4 lorsque la plante vieillit.

Les étages supérieurs, du fait de leur position privilégiée par rapport à la rampe de pulvérisation et de leur capacité accrue à retenir du produit (plus de mouillabilité au stade DFE bien que la plante demeure peu mouillable cf hypothèse énoncée précédemment) auraient tendance à capter plus de traceur par unité de surface. Par conséquent, l'étage foliaire le plus bas, sous-jacent de tous les autres se situe plus à l'ombre du jet pulvérisé à cause de l'effet écran provoqué par le couvert végétal (Gauvrit, 1996). Il reçoit donc, pour une même dose appliquée, moins de produit. D'autre part, plus la plante a un niveau de mouillabilité important moins l'orientation influence la rétention (Wirth et al., 1991). Ceci expliquerait le fait que, bien que F1 soit en position verticale au stade DFE, elle retient tout de même des quantités considérables de traceur.

3.3 Un gradient de rétention en fonction du volume

Le volume pulvérisé retenu dépend de la combinaison de nombreux facteurs comme les conditions climatiques, la taille et la vitesse des gouttes ainsi que la géométrie du couvert.

Bien que peu marquée, on constate une rétention décroissante lorsque le volume de bouillie augmente. Ces résultats sont cohérents avec d'autres travaux comme ceux de Miller et al., 2000 et Ellis et al., 2007. Nous associons cet effet à une différence graduelle de la taille des gouttes. En effet, plus le volume augmente et plus le VMD est important augmentant ainsi les risques d'écoulement et diminuant la rétention. A 40 l/ha il y a 21 % en plus de rétention par rapport à la modalité 200 l/ha au stade 2N. Cette différence est moins visible au stade DFE (1 % de différence) mais nous supposons un problème d'application pour ce volume. Si on considère l'écart entre 40 l/ha et 150 l/ha, celui-ci a une valeur constante entre les stades soit 20 % et 17 % respectivement pour le stade 2N

et DFE et idem pour l'écart entre 40 l/ha et 80 l/ha (9 % et 10 %). Cette tendance est concordante avec d'autres travaux de Miller et al. qui mettent en évidence des différences semblables pour les mêmes stades en comparant les volumes d'application à 100 l/ha et 200 l/ha (Miller et al., 2000). Cependant le différentiel du dépôt dépend encore une fois de la nature du support. Comme l'indique Ellis et al., 2007 « la réduction des volumes tend à augmenter les dépôts sur la cible en particulier si celle-ci est à port vertical ».

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer les valeurs anormalement élevées pour la modalité 200 l/ha au stade DFE. Il pourrait premièrement s'agir d'un problème de buse. L'étude menée par l'IRSTEA dans le cadre du projet ECHAP vise à comparer les quatre buses utilisées en termes de granulométrie et vélocimétrie (IRSTEA, 2011). Cette dernière ne soulève pas de différence entre les vitesses des gouttes mais divise en deux groupes les buses en fonction du diamètre des gouttes obtenues. Avec l'eau, la granulométrie varie assez peu entre les calibres 015, 020 et 030. Pour le calibre 040, on note l'apparition de plus grosses gouttes en périphérie. Ceci pourrait expliquer l'hétérogénéité des dépôts obtenus à partir de cette dernière buse. D'autre part, il nous semble important de souligner qu'un changement des conditions climatiques a eu lieu lors du deuxième traitement. Ces variations concernent la vitesse du vent qui a augmenté au moment de faire le traitement au volume de 200 l/ha. Le graphique en **Annexe XXV** détaille la progression du vent lors de la période d'application. On estime avoir traité les parcelles à un moment où le vent était modéré. Or, si le vent modifie la trajectoire des gouttes et occasionne de la turbulence sur le feuillage alors l'angle d'incidence augmente et la rétention avec lui (Gauvrit, 1996). En 2010, Miller et al. réalisèrent une expérience qui compare les dépôts lors d'une situation avec vent (1 m/s) et sans vent sur des cibles verticales. Il ressort que sans vent, le dépôt est réduit entre 60 et 80 % pour des volumes de bouillie allant de 75 à 225 L/ha (Miller et al., 2010). Le vent modérément fort observé au moment du traitement tartrazine pourrait expliquer les fortes valeurs de dépôt pour V=200 L/ha au stade DFE.

3.4 Comparaison des résultats entre saisons

L'expérience d'interception foliaire de l'année dernière ne comportait pas de dispositif en bloc et donc pas de répétition, ce qui empêche l'étude des interactions doubles ou triples entre les facteurs. C'est pourquoi nous avons choisi d'étudier séparément les jeux de données des deux années consécutives en mettant l'accent sur les résultats de la saison 2011-2012. Par la suite, nous allons confronter les résultats des deux années et en particulier expliquer les résultats de l'année dernière en fonction des conclusions de cette année. Les graphiques concernant la campagne 2010-2011 sont présentés en **Annexe XXVI**.

3.4.1 Différences entre les deux campagnes d'expérimentation

Les profils de répartition ainsi que les quantités totales retenues diffèrent entre le couple (Mercia, Rht3) et Trémie. Or Rht3 et Mercia sont des plantes quasi-identiques sur le plan génétique à l'exception du gène de nanisme. On suppose donc qu'il y a de fortes ressemblances entre les deux variétés notamment sur les profils de rétention (**Annexe XXVI**).

Le profil de rétention entre les niveaux est particulier pour Mercia et Rht3 pour qui, au stade 2N seulement 50 % des plantes présentaient un niveau foliaire F4. Pour ce stade, le faible nombre d'échantillons pour le quatrième niveau nous a conduits à ne pas le considérer.

Globalement, au stade 2N, les étages du milieu et les étages inférieurs sont nettement favorisés. Nous expliquons ce phénomène par la faible densité du couvert. En effet, le LAI calculé à partir des trois derniers niveaux est de 2,55 et 1,57 respectivement pour Mercia et Rht3. Les différences entre les étages foliaires s'estompent au stade DFE auquel cas on peut supposer une superposition des feuilles comme pour Trémie.

Pour ce qui relève de la variable volume, une analyse de variance faite sur le jeu de données ne soulève pas d'effet significatif pour ce facteur. Ce qui rend difficile la conclusion sur cet aspect étant donné les résultats différents entre les campagnes. Une troisième année de projet avec les trois variétés permettrait de trancher sur la tendance.

On suppose que les différences existantes avec Trémie sont majoritairement liées à l'effet variété très marqué. Une ANOVA qui réunit les trois variétés souligne une probabilité critique de $1.56e-09$ pour cet effet ce qui est fortement significatif. Dans la littérature, la distinction entre cultivars a été mise en évidence notamment sur l'aspect de mouillabilité (Uddin et Marshall, 1988). De même des différences de densités foliaires pourraient être à l'origine des différences favorisant la rétention chez Trémie car dès le stade 2N elle possède un LAI quatre fois plus important que le couple (Mercia, Rht3) (**Annexe XIV**).

En résumé, l'effet variété est guidé par différents facteurs : la densité foliaire lorsque la plante est jeune et les propriétés de mouillabilité à un instant donné mais aussi leur évolution au cours du temps. Les deux essais permettent cependant d'indiquer une ressemblance. Quel que soit la variété, la forme du profil de répartition entre les étages foliaires ne varie pas en fonction du volume pour un stade donné.

Cette comparaison possède une limite importante qui est que l'effet variété est confondu avec l'effet année ce qui accentue les différences.

3.4.2 Les différences entre Mercia et Rht3.

Globalement Mercia retient moins que la variété naine Rht3 et ce notamment pour les niveaux F2 et F3. Nous pensons que la distance entre les étages foliaires affecte la quantité déposée. Plus la distance entre les nœuds est faible et moins il y a de risques d'évaporation des gouttes et donc de pertes. En effet, lorsque l'air est sec, les gouttes d'un diamètre inférieur à $80 \mu\text{m}$ ont des chances de se dessécher avant d'arriver sur les feuilles (Gauvrit, 1996). A partir d'une ANOVA qui compare les quantités totales retenues en fonction du stade, du volume et de la variété, seul le dernier facteur est significatif.

Pour ces deux variétés, le bilan de masse montre que la rétention ne varie pratiquement pas entre 2N et DFE (facteur non significatif) bien que ce dernier présente quatre niveaux foliaires au lieu de trois et que le LAI double entre les deux stades (**Annexe XIV**). Ces résultats diffèrent avec les observations de 2011-2012. L'étude détaillée des niveaux en 2011 montre que tous les étages foliaires retiennent légèrement moins au stade DFE. Ces résultats suggèrent qu'il s'agirait principalement d'un dépôt plus fin au stade DFE ou bien que des processus environnementaux auraient favorisé ce comportement. L'environnement possède la capacité de modifier la fabrication des cires. C'est la conclusion à laquelle arrive Troughton et Hall en 1967. Pour une même variété ils observent des différences sur la surface des feuilles poussées en serre et en plein champs. D'autres publications affirment que dans le cas du blé, les fortes températures peuvent entraîner une surproduction de cires comme mécanisme de défense contre la déshydratation (Uddin et Marshall, 1988) diminuant ainsi la mouillabilité des feuilles. Or, la saison 2010-2011 s'est caractérisée par une longue période de sécheresse qui a progressivement affecté les feuilles de blé (Figure 15). A cela se rajoute le fait que les parcelles de Mercia et Rht3 ont été lésées par le Léma. La présence de ravageurs et le fort stress hydrique ainsi que la spécificité variétale auraient pu jouer un rôle important dans la rétention entraînant ainsi une diminution de celle-ci. En effet, même si la densité est importante les gouttes contenant la bouillie n'ont pas été retenues par la feuille et seraient tombées par écoulement ou rebondissement. Cette hypothèse semble vraie d'autant plus que ces résultats ne se vérifient pas pour la variété Trémie.

3.5 Modèle d'interception foliaire

Le modèle ici créé a pour but d'expliquer le comportement d'un produit qui intercepte une canopée à un instant t . En outre, le modèle permet de valider l'hypothèse de départ sur la densité foliaire.

Une relation entre le LAI et l'interception avait déjà été prouvée par le modèle de Bonciarelli et Covarelli, 1995. Ce dernier souligne l'importance de séparer les courbes en fonction du volume bien que les volumes étudiés étaient nettement plus élevés et que l'étude ne se limitait qu'à une variété.

L'analyse menée permet de choisir un modèle d'interception du produit sur le couvert qui fournit une courbe par variété, par volume et par stade. Si on ne considère que les variétés Mercia et Rht3, le modèle choisi aurait compris une courbe par variété et par stade sans distinction des volumes. C'est la variété Trémie qui l'exige, d'où l'importance de valider ce modèle par une troisième année où l'ensemble des trois variétés sont confrontées. Ceci est également important par le fait que l'effet variété est fortement confondu avec l'effet année comme expliqué précédemment.

Il a été démontré que le modèle s'ajuste mieux en considérant des courbes séparées en fonction du stade phénologique. Cependant, l'influence de ce facteur semble être faible et il serait donc intéressant de prendre en compte des mesures à d'autres stades afin de trouver une éventuelle relation entre ces derniers et de ne considérer qu'une seule courbe pour ce paramètre.

3.6 Perspectives d'amélioration : la taille de l'échantillonnage

L'échantillon théorique est important du fait de la forte variabilité observée dans les essais en plein champ. La littérature suggère que la variabilité est susceptible de changer en fonction de l'espèce et du type de manipulation (laboratoire ou plein champ). En effet, le coefficient de variation (CV) pour les vignobles oscille entre 30-61 %, 21-137 % pour les vergers de pommiers et 42-80% pour les citrus. Dans notre étude, les valeurs pour le blé se situent entre 35 % et 90 %. Or un CV élevé implique que les tendances de répartition du dépôt sur la canopée sont difficiles à discerner. C'est pourquoi nous nous intéressons à déterminer l'échantillonnage idéal. Dans cette partie, la taille de notre échantillon est calculée à partir du CV de la variété Trémie mais étant donné que l'essai vise à tester plusieurs traitements (volume de bouillie et variétés qui diffèrent) alors il est probable que la valeur de l'échantillonnage soit nettement plus importante.

Le nombre d'échantillons prélevés doit être suffisamment important pour prendre en compte la variabilité de dépôt attendue et pour obtenir des résultats avec le degré de précision souhaité. Si on suppose une distribution normale des échantillons, alors un échantillon défini à un seuil de confiance de 95 % et avec une marge d'erreur de + ou - 10% permettra d'extrapoler les résultats de l'expérience avec 5 % des risques de se tromper de + ou - 10 %. Sous ces conditions il est possible de calculer la taille de l'échantillonnage qu'il faudrait prélever en théorie. En supposant un coefficient de variation de 90 % qui est la valeur maximum du CV observée dans les essais, le nombre minimum d'échantillon de feuilles à prélever est 312. Cette valeur est obtenue grâce à la

formule suivante : $n = t \times \frac{CV}{m}^2$

n = taille d'échantillon requise

t = niveau de confiance à 95%

m = marge d'erreur à 10%

CV = coefficient de variation

Cependant, adapter cette valeur théorique d'échantillonnage à l'essai d'interception foliaire semble impossible étant donné qu'il s'agit d'une manipulation lourde. Toutefois, après les trois années de projet, le jeu de données sera plus conséquent et on pourra espérer que les tendances du spectre de répartition du dépôt sur le couvert se dégageront de façon plus déterminante.

Conclusion

L'objectif de ce stage était d'étudier la répartition du produit sur la canopée et de valider des techniques innovantes dans la lutte fongicide contre *S. tritici* en combinant architecture du couvert et réduction du volume de pulvérisation et de la dose de fongicide.

Le niveau de maladie a été étudié durant deux années consécutives. La première campagne s'est caractérisée par une pression parasitaire très faible (10 %) contrairement à la seconde où le témoin a été sept fois plus atteint (70 %). Le niveau de maladie a été plus important pour la variété naine Rht3 que pour Mercia mais la différence n'est pas significative. Pour la variété Trémie (2012), le témoin avait 19 % d'intensité de maladie en plus par rapport au traitement de référence. Dans le cadre du projet ECHAP, cette expérience permet d'ajuster le modèle épidémiologique aux paramètres architecturaux et notamment caractériser la maladie par niveau foliaire. Cependant, le faible taux de maladie lors de la première année a apporté peu de résultats comparatifs.

L'application fongicide visait à comparer plusieurs volumes de bouillie d'un traitement à base d'époxiconazole (OPUS®) appliqué à différentes doses. Cependant, le faible niveau de maladie en 2011 ne permet pas de comparer les traitements entre eux. Seule la deuxième année met en évidence un effet dose et l'absence d'un effet volume en termes d'efficacité biologique, rendement et PMG. La technique du bas volume semblerait être tout aussi satisfaisante que les volumes conventionnels tout en étant avantageuse car elle augmente le débit de chantier. De plus, la réduction de dose de produit, souvent associée aux applications de bas volume, ne permet pas de sécuriser les traitements et réduit l'efficacité biologique. La date d'application semble aussi influencer le rendement et le PMG. Le programme fongicide doit donc être ajusté à l'architecture du couvert végétal afin de fournir des stratégies plus adaptées et efficaces si possible.

D'autre part, les mesures d'interception d'un traceur sur la canopée ont permis d'observer la rétention en fonction du volume pour chaque niveau foliaire. L'interception foliaire est dépendante de nombreux paramètres de l'architecture du couvert, du fongicide et des conditions climatiques (vent) qui devront être priorisés afin de permettre l'élaboration d'un modèle complexe (Septo3D). Concernant l'architecture du blé, on distingue notamment la géométrie de la plante (hauteur de la talle, niveau d'insertion des feuilles et port de la plante), les variations de la surface foliaire (cires épicuticulaires et mouillabilité) ainsi que la densité foliaire. De plus, la technique d'application du fongicide peut faire varier la taille des gouttes à l'origine des variations de rétention observées pour les différents volumes de bouillie utilisés. Les résultats de 2012 mettent en évidence un léger effet volume qui n'est pas observé l'année précédente. D'autre part, ces différences ne sont pas suffisamment importantes pour provoquer des variations d'efficacité biologique ou de rendement. Il est alors difficile de conclure sur cet aspect. De plus, la comparaison entre les années est limitée par le fait que les variétés diffèrent entre les campagnes. La troisième et dernière année du projet ECHAP devra donc confronter les trois variétés afin de déterminer la tendance.

Enfin, la tartrazine est un solide qui se dépose sur la feuille lorsque le solvant s'évapore tandis que le produit fongicide OPUS® demeure liquide et doit pénétrer ainsi dans la feuille. Nous n'avons donc observé qu'une partie du phénomène : le dépôt sur la plante. Le suivi du produit dans la plante via un traceur marqué aurait permis de compléter les résultats obtenus en termes de dépôt.

Liste bibliographique

- Ando, K., Grumet, R., Terpstra, K., Kelly, J.D., 2007. Manipulation of plant architecture to enhance crop disease control. *CAB Review: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 2, p. 8.
- Arraiano, L.S., Balaam, N., Fenwick, P.M., Chapman, C., Feuerhelm, D., Howell, P., Smith, S.J., Widdowson, J.P., Brown, J.K.M., 2009. Contributions of disease resistance and escape to the control of *Septoria tritici* blotch of wheat. *Plant Pathology* 58, p. 910–922.
- Arvalis-Institut du végétal. Traitements et interventions de printemps des céréales: Septoriose l'année de tous les dangers! Champagne-Ardenne Lorraine: Arvalis-Institut du végétal, 2005, p.23-40. Choisir n° Céréales 2
- Arvalis-Institut du végétal. Traitements et interventions de printemps des céréales: Septoriose une absence remarquée. Alsace: Arvalis-Institut du végétal, 2011, p. 74-95 Choisir n° Céréales 2.
- Bache, D.H., 1985. Prediction and analysis of spray penetration into plant canopies. In: British Crop Protection Council, Monogram n° 28: Application and Biology, Ed: E.S.E. Southcombe, Croydon, England, p. 183–190.
- Bahat, A., 1980. Factors Affecting the Vertical Progression of *Septoria* Leaf Blotch in Short-Statured Wheats. *Phytopathology* 70, p. 179.
- Balandier, P., Marquier, A., Perret, S., Collet, C., Courbaud, B., others, 2010. Comment estimer la lumière dans le sous-bois forestier à partir des caractéristiques dendrométriques des peuplements? *RDV techniques- ONF, Hiver-Printemps 2010*, n°27-28.
- Barthlott, W., Neinhuis, C., Cutler, D., Distch, F., Meusel, I., Theisen, I., Wilhelmi, H., 1998. Classification and terminology of plant epicuticular waxes. *Botanical Journal of the Linnean Society* 126, 237–260.
- Baudart, C., Pelce, L., Bigonneau, N., Flodrops, Y., Briffaux, G., Messmer, Y., Bray, A., Bodilis, A.M., Boudier, E., Cochet, B., Moynier, J.-L., Drillaud-Marteau, C., 2008. Stratégies fongicides régionales: 09 Exemples de programmes fongicides. *Perspectives Agricoles*, n°342, p. 24–36.
- Bonciarelli, U., Covarelli, G., 1995. Determination of the amount of herbicide solution intercepted by wheat (*triticum aestivum*) canopies at different growth stages. *Rivista di Agronomia* 29, n° 3 SUP, p. 476–479.
- Bonin, L., Gautellier-Vizioz, L., 2012. Herbicides anti-graminées foliaires. Les adjuvants compensent la dérive d'efficacité. *Perspectives Agricoles*, n°386, p. 46–49.
- Brading, P.A., Verstappen, E.C.P., Kema, G.H.J., Brown, J.K.M., 2002. A gene-for-gene relationship between wheat and *Mycosphaerella graminicola*, the *Septoria tritici* blotch pathogen. *Phytopathology* 92, p. 439–445.
- Bryant, J.E., Courshee, R.J., 1985. The effect of volume of application from hydraulic nozzles on the partitioning of a pesticide spray in a cereal canopy. In: British Crop Protection Council, Monogram n° 28: Application and Biology, Ed: E.S.E. Southcombe, Croydon, England, p. 201–210.
- Cooke, B.K., Herrington, P.J., Jones, K.G., Morgan, N.G., 1976. Pest and disease control with low doses of pesticides in low and ultralow volumes applied to intensive apple trees. *Pesticide Science* 7, p. 30–34.
- Cowger, C., McDonald, B.A., Mundt, C.C., 2002. Frequency of sexual reproduction by *Mycosphaerella graminicola* on partially resistant wheat cultivars. *Phytopathology* 92, p. 1175–1181.

- Cross, J.V., Berrie, A.M., 1990. Efficacy of reduced volume and reduced dose rate spray programmes in apple orchards. *Crop Protection* 9, p. 207–217.
- Cuthbert, R., 2011. Molecular mapping of septoria tritici blotch resistance in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). Doctorate Plant Science, University of Manitoba, Winnipeg
- Ellis, M.C.B., Knight, S., Miller, P.C.H., Spray behaviour and efficacy of herbicides and fungicides applied to wheat at reduced volumes. Bedfordshire and Norfolk: Authority, H.G.C., 2007, 52p. n° 408.
- Eyal, Z., Scharen A. L., Prescott, J.M., van Ginkel, M. 1987. The Septoria diseases of wheat: concepts and methods of disease management. Ed: CIMMYT, Mexico. D.F, 45p.
- Ferrie, Y.. Lutter contre les maladies du blé. Tarn: Chambre d'agriculture du Tarn, 2010.
- Fournier C, Andrieu B, Ljutovac S, Saint-Jean S 2003. ADEL-wheat: a 3D architectural model of wheat development. In 'Plant growth modeling and applications' International Symposium, Beijing, October 13-16, p. 54–63.
- Gauvrit, C., 1996. Efficacité et sélectivité des herbicides. Ed INRA, Du Labo au Terrain, Paris, 158 p.
- Ghaffary, S., Faris, J., Friesen, T., Visser, R., van der Lee, T., Robert, O., Kema, G., 2012. New broad-spectrum resistance to septoria tritici blotch derived from synthetic hexaploid wheat. *TAG Theoretical and Applied Genetics* 124, p.125–142.
- Ghaffary, S., Robert, O., Laurent, V., Lonnet, P., Margalé, E., van der Lee, T., Visser, R., Kema, G., 2011. Genetic analysis of resistance to septoria tritici blotch in the French winter wheat cultivars Balance and Apache. *TAG Theoretical and Applied Genetics* 123, p. 741–754.
- Ginkel, M. van, McNab, A., Krupinsky, J., 1999. Septoria and Stagonospora Diseases of Cereals: A Compilation of Global Research. In: Proceedings of the Fifth International Septoria Workshop, CIMMYT, Mexico, September 20-24, 1999, 186 p.
- Goodwin, S., 2007. Back to basics and beyond: increasing the level of resistance to Septoria tritici blotch in wheat. *Australasian Plant Pathology* 36, p. 532–538.
- Gouache, D., Jorgensen, L.N., 2008. Limiter les maladies sans avoir recours aux fongicides? *Perspectives Agricoles*, n°348, p. 52-56.
- Gough, F.J., 1978. Effect of wheat host cultivars on pycnidiospore production by Septoria tritici. *Phytopathology* 68, p. 1343–1345.
- Grayson, B.T., Webb, J.D., Pack, S.E., Edwards, D., 1991. Development and assessment of a mathematical model to predict foliar spray deposition under laboratory track spraying conditions. *Pesticide Science* 33, n° 3, p. 281–304.
- Hansen, J.G., Secher, B.J.M., Jørgensen, L.N., Welling, B., 1994. Thresholds for control of Septoria spp. in winter wheat based on precipitation and growth stage. *Plant Pathology* 43, p. 183–189.
- IRSTEA, 2011. Compte rendu des mesures de granulométrie dans le cadre du projet ECHAP (communication non publiée).
- Jørgensen, L.N., Jahn, M., Clark, B., Antichi, D., Góral, T., Schepers, H., Lucas, P., Gouache, D., Hornok, L.. Endure – wheat case study. Best control practices of diseases in winter wheat, 2008, n° Deliverable DR1.2.

- Linders, J., Mensink, H., Stephenson, G., Wauchope, D., Racke, K., others, 2000. Foliar interception and retention values after pesticide application. A proposal for standardized values for environmental risk assessment. *Pure and Applied Chemistry* 72, n°11; p. 2199–2216.
- Lovell, D.J., Parker, S.R., Hunter, T., Royle, D.J., Coker, R.R., 1997. Influence of crop growth and structure on the risk of epidemics by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) in winter wheat. *Plant Pathology* 46, p. 126–138.
- Lovell, D.J., Parker, S.R., Hunter, T., Welham, S.J., Nichols, A.R., 2004. Position of inoculum in the canopy affects the risk of septoria tritici blotch epidemics in winter wheat. *Plant Pathology* 53, p. 11–21.
- Lowe, H.J.B., Murphy, G.J.P., PARKER, M.L., 1985. Non-glaucousness, a probable aphid-resistance character of wheat. *Annals of Applied Biology* 106, p. 555–560.
- Massinon, M., Boukhalfa, H. dite H., MARECHAL, P.-, Lebeau, F., 2012. The effect of leaf orientation on spray retention on Blackgrass In: 11 th international conference on precision Agriculture, Indianapolis USA, 15-18 Juillet, 10 p.
- Miller, P.C.H., Ellis, M.C.B., Bateman, R., Lane, A.G., O'Sullivan, C.M., Tuck, C.R., Robinson, T.H., Balsari, P., Carpenter, P.I., Cooper, S.E., others, 2010. Deposit distributions on targets with different geometries and treated with a range of spray characteristics., in: International Advances in Pesticide Application, Cambridge, UK, 5-7 January 2010. pp. 241–248.
- Miller, P.C.H., Lane, A.G., Wheeler, H.C., 2000. Matching the application of fungicides to crop canopy characteristics. In: The BCPC Conference: Pests and diseases, Volume 2. Proceedings of an international conference held at the Brighton Hilton Metropole Hotel, Brighton, UK, 13-16 November 2000., British Crop Protection Council, p. 629–636.
- Pergher, G., 2001. Recovery rate of tracer dyes used for spray deposit assessment. *Transactions-American Society of Agricultural Engineers* 44, p. 787–796.
- Perriot, B. Pulvérisation: Techniques et conditions d'application des produits phytosanitaires Boigneville: Arvalis-Institut du Végétal, 2012, 150 p. (rapport non publié).
- Perriot, B., Denis, T., 2011a. Réduction des volumes en désherbage. Bien choisir ses buses, sa vitesse et ses conditions d'application. *Perspectives Agricoles*, n° 378 p.16–18.
- Perriot, B., Denis, T., 2011b. Réduction des volumes en désherbage. L'efficacité des traitements dépend du type de produit. *Perspectives Agricoles*, n° 378, p. 10–14.
- Richardson, B., Newton, M., 2000. Spray deposition within plant canopies. In: New Zealand Plant Protection Conference, 2000, 53, p. 248–252.
- Richardson, B., Ray, J., Vanner, A., 1986. Retention of spray on bracken pinnae: effect of application volume and formulation. *NZJ For. Sci* 16, p. 87–95.
- Robert, C., Andrieu, B., Fournier, C., Gouache, D., Gate, P., Ney, B., 2009. SEPTO3D: a model to analyze the effects of wheat canopy structure on epidemics of septoria. In: Association Française de Protection des Plantes, 9ème conférence internationale sur les maladies des plantes, Tours, France, 8 et 9 Décembre 2009, p. 472–482.
- Robert, C., Fournier, C., Andrieu, B., Ney, B., 2008. Coupling a 3D virtual wheat (*Triticum aestivum*) plant model with a *Septoria tritici* epidemic model (Septo3D): a new approach to investigate plant–pathogen interactions linked to canopy architecture. *Funct. Plant Biol.* 35, p. 997–1013.

- Royle, D.J., Shaw, M.W., Cook, R.J., 1986. Patterns of development of *Septoria nodorum* and *S. tritici* in some winter wheat crops in Western Europe, 1981-83. *Plant Pathology* 35, p. 466–476.
- Shaw, M.W., Royle, D.J., 1986. Saving *Septoria* fungicide sprays: the use of disease forecasts, in: British Crop Protection Conference-Pests and Diseases. 1986, pp. 1193–1200.
- Shaw, M.W., Royle, D.J., 1993. Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) on winter wheat in the UK. *Plant Pathology* 42, p. 882–899.
- Spillman, J., 1982. Atomizers for the aerial application of herbicides—ideal and available. *Crop Protection* 1, p. 473–482.
- Spillman, J.J., 1984. Spray impaction, retention and adhesion: An introduction to basic characteristics. *Pesticide Science* 15, n°2, p. 97–106.
- Thomas, M.R., Cook, R.J., King, J.E., 1989. Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its effect on yield. *Plant Pathology* 38, n° 2, p. 246–257.
- Troughton, J.H., Hall, D.M., 1967. Extracuticular wax and contact angle measurements on wheat (*Triticum vulgare* L.). *Australian Journal of Biological Sciences* 20, p. 509–526.
- Uddin, M.N., Marshall, D.R., 1988. Variation in epicuticular wax content in wheat. *Euphytica* 38, p. 3–9.
- Viljanen-Rollinson, S.L.H., Marroni, M.V., Butler, R.C., Deng, Y., Armour, T., others, 2005. Latent periods of *Septoria tritici* blotch on ten cultivars of wheat. *New Zealand Plant Protection* 58, p. 256–260.
- Wirth, W., Storp, S., Jacobsen, W., 1991. Mechanisms controlling leaf retention of agricultural spray solutions. *Pesticide Science* 33, p. 411–420.

Liste Sitographique

- Action Distribution Directe, 2010. Bas volume. [<http://www.a2d.fr/page-Bas-volume-pulverisation-agricole.html>]. (consulté le 24/05/2012)
- BASF the Chemical Company, Agriculture durable, 2012. Fongicides : l'efficacité des triazoles est-elle menacée ? [http://www.agro.basf.fr/agroportal/fr/fr/enjeux_et_engagements/programmes_de_recherche_agronomique/fongicide__efficacite_des_triazoles/triazoles.html] (consulté le 12/04/2012)
- Bayer Agri, Septoriose : vigilance tout au long du cycle du blé. [<http://www.bayer-agri.fr/problematiques/septoriose-ble-tendre/septoriose-vigilance-tout-au-long-du-cycle-du-ble/>]. (consulté le 12/04/2012)
- Dollé, S., 2011. Septoriose : de nouvelles souches toujours plus résistantes. Le syndicat Agricole. [<http://www.syndicat-agricole.com/actualites/vie-pratique-ble-septoriose-de-nouvelles-souches-toujours-plus-resistantes&fldSearch=:TJER6QJ7.html>] (consulté le 15/04/2012)
- FAO stat, 2010, Country rank in the world, by commodity [<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>] (consulté le 15/04/2012)
- INRA UMR EGC, 2011. Réduire l'utilisation des fongicides en associant stratégies de traitements optimales et couverts ECHAPpant aux maladies. [poidevin.s.free.fr/img/Projet_Echap.pdf]. (consulté le 20/03/2012).
- Teejet Technologies, 2012, [<http://www.teejet.com/french/home/products/spray-products/broadcast-spray-nozzles/xr-teejet.aspx>]. (consulté le 15/06/2012)

Annexe I Echelle de Zadoks

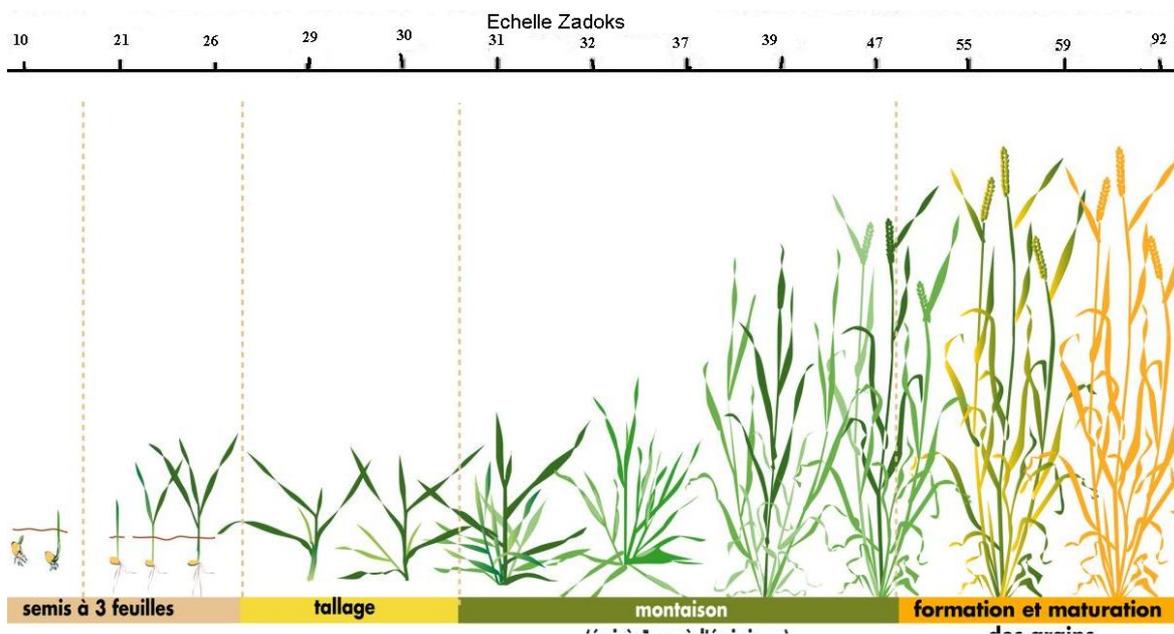


Figure 27: Développement de la plante de blé (Arvalis - Institut du végétal)

Annexe II Comparaison de la structure épicuticulaire de différentes espèces

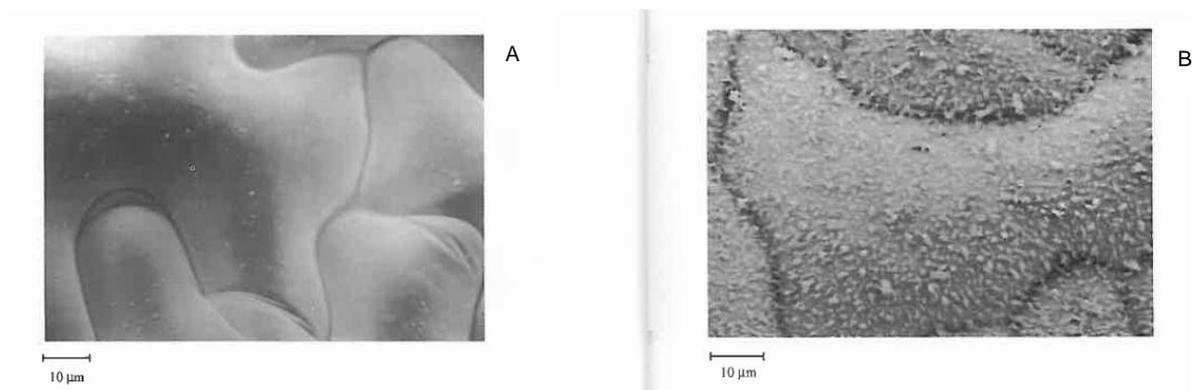


Figure 28: Observation au microscope électronique à balayage sur les faces foliaires adaxiales du gaillet (A) et du colza (B) Source: (Gauvrit, 1996)

Tableau 15: Propriétés des surfaces foliaires de quelques plantes

Espèce	Mouillabilité
Blé	Faible
Mais	Faible
Betterave	Elevée
Colza	Faible
Gaillet	Elevée
Ray Grass	Elevée
Pois	Elevée
Haricot	Elevée
Tournesol	Elevée
Véronique	Elevée
Chénopode	Faible

Annexe III Dispositif de l'essai en 2010- 2011

Edité le 16/08/2012

Projet ECHAP



Piquetage bordures de parcelles

Colza

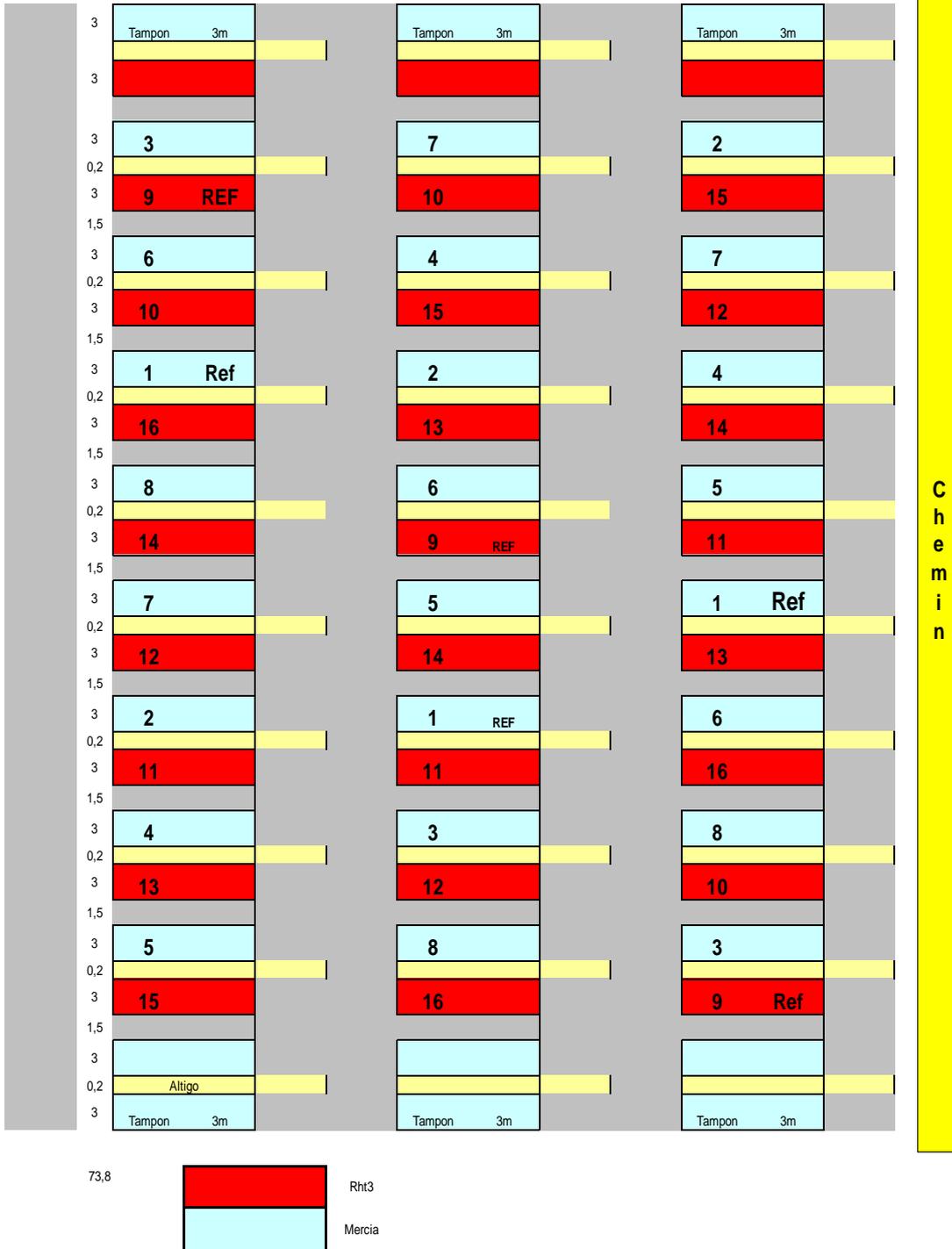


Figure 29: Dispositif expérimental de la campagne 2010-2011

Tableau 16: Modalités étudiées lors de la campagne 2010-2011

Le volume de bouillie:	La dose	La fréquence
<ul style="list-style-type: none"> - 200 l/ha - 150 l/ha - 80 l/ha - 40 l/ha 	<ul style="list-style-type: none"> - 0.5 l/ha - 1 l/ha 	<ul style="list-style-type: none"> - Deux traitements (T1 + T2) - Un seul traitement (T1 ou T2) avec T1 l'application au stade 2N et T2 celle au stade DFE.

Le Tableau 17 ci-dessous présente l'ensemble des huit traitements contenus dans un bloc et pour une variété.

Tableau 17: Combinaisons des modalités (traitements) de tous les facteurs étudiés en 2010-2011

Traitement	Fréquence et date traitement	Dose par application (l/ha)	Volume bouillie (l/ha)
1	T1 + T2	1	200
2	0	0	200
3	T1	1	200
4	T2	1	200
5	T1 + T2	0,5	200
6	T1 + T2	0,5	150
7	T1 + T2	0,5	80
8	T1 + T2	0,5	40

Annexe IV Dispositif de l'essai en 2011-2012



Figure 30: Dispositif expérimental de la campagne 2011-2012



Figure 31: Orientation de l'essai 2011-2012

Annexe V Matériel utilisé



Figure 32: Quad équipé d'un pulvérisateur à air comprimé

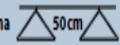


Figure 33: Station météorologique placée sur l'essai ECHAP à la station de Boigneville, Arvalis - Institut du végétal

Tableau 18: Conditions d'application lors des traitements fongicides

	Traitement 1 (12/04/2012)	Traitement 2 (10/05/2012)
Début	Heure: 7:00	heure: 8:30
	Hygrométrie: 97 %	Hygrométrie: 97 %
	Température sol: -0,6 °C	Température sol: 17,8 °C
	Vent: nul	Vent: nul
Fin	Hygrométrie: 87 %	Hygrométrie: 98 %
	Température sol: 5,0 °C	Température sol: 19,2 °C
	Vent: nul	Vent: nul
	Heure: 8:48	Heure: 9:20

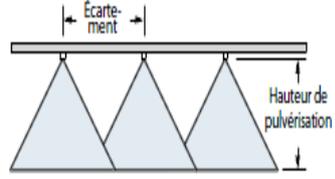
Annexe VI Choix et réglage des buses

Type de buse	Pression (bar)	Taille des gouttelettes		Débit d'une buse en l/min	l/ha 												
		80°	110°		4	5	6	7	8	10	12	16	18	20	25	30	35
		km/h	km/h		km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h
XR8001 XR11001 (100)	1,0	M	F	0,23	69,0	55,2	46,0	39,4	34,5	27,6	23,0	17,3	15,3	13,8	11,0	9,2	7,9
	1,5	F	F	0,28	84,0	67,2	56,0	48,0	42,0	33,6	28,0	21,0	18,7	16,8	13,4	11,2	9,6
	2,0	F	F	0,32	96,0	76,8	64,0	54,9	48,0	38,4	32,0	24,0	21,3	19,2	15,4	12,8	11,0
	2,5	F	F	0,36	108	86,4	72,0	61,7	54,0	43,2	36,0	27,0	24,0	21,6	17,3	14,4	12,3
	3,0	F	F	0,39	117	93,6	78,0	66,9	58,5	46,8	39,0	29,3	26,0	23,4	18,7	15,6	13,4
4,0	F	VF	0,45	135	108	90,0	77,1	67,5	54,0	45,0	33,8	30,0	27,0	21,6	18,0	15,4	
XR80015 XR110015 (100)	1,0	M	F	0,34	102	81,6	68,0	58,3	51,0	40,8	34,0	25,5	22,7	20,4	16,3	13,6	11,7
	1,5	M	F	0,42	126	101	84,0	72,0	63,0	50,4	42,0	31,5	28,0	25,2	20,2	16,8	14,4
	2,0	F	F	0,48	144	115	96,0	82,3	72,0	57,6	48,0	36,0	32,0	28,8	23,0	19,2	16,5
	2,5	F	F	0,54	162	130	108	92,6	81,0	64,8	54,0	40,5	36,0	32,4	25,9	21,6	18,5
	3,0	F	F	0,59	177	142	118	101	88,5	70,8	59,0	44,3	39,3	35,4	28,3	23,6	20,2
4,0	F	F	0,68	204	163	136	117	102	81,6	68,0	51,0	45,3	40,8	32,6	27,2	23,3	
XR8002 XR11002 (50)	1,0	M	M	0,46	138	110	92,0	78,9	69,0	55,2	46,0	34,5	30,7	27,6	22,1	18,4	15,8
	1,5	M	F	0,56	168	134	112	96,0	84,0	67,2	56,0	42,0	37,3	33,6	26,9	22,4	19,2
	2,0	M	F	0,65	195	156	130	111	97,5	78,0	65,0	48,8	43,3	39,0	31,2	26,0	22,3
	2,5	M	F	0,72	216	173	144	123	108	86,4	72,0	54,0	48,0	43,2	34,6	28,8	24,7
	3,0	M	F	0,79	237	190	158	135	119	94,8	79,0	59,3	52,7	47,4	37,9	31,6	27,1
4,0	F	F	0,91	273	218	182	156	137	109	91,0	68,3	60,7	54,6	43,7	36,4	31,2	
XR110025 (50)	1,0	M	M	0,57	171	137	114	97,7	85,5	68,4	57,0	42,8	38,0	34,2	27,4	22,8	19,5
	1,5	M	M	0,70	210	168	140	120	105	84,0	70,0	52,5	46,7	42,0	33,6	28,0	24,0
	2,0	F	F	0,81	243	194	162	139	122	97,2	81,0	60,8	54,0	48,6	38,9	32,4	27,8
	2,5	F	F	0,90	270	216	180	154	135	108	90,0	67,5	60,0	54,0	43,2	36,0	30,9
	3,0	F	F	0,99	297	238	198	170	149	119	99,0	74,3	66,0	59,4	47,5	39,6	33,9
4,0	F	F	1,14	342	274	228	195	171	137	114	85,5	76,0	68,4	54,7	45,6	39,1	
XR8003 XR11003 (50)	1,0	M	M	0,68	204	163	136	117	102	81,6	68,0	51,0	45,3	40,8	32,6	27,2	23,3
	1,5	M	M	0,83	249	199	166	142	125	99,6	83,0	62,3	55,3	49,8	39,8	33,2	28,5
	2,0	M	F	0,96	288	230	192	165	144	115	96,0	72,0	64,0	57,6	46,1	38,4	32,9
	2,5	M	F	1,08	324	259	216	185	162	130	108	81,0	72,0	64,8	51,8	43,2	37,0
	3,0	M	F	1,18	354	283	236	202	177	142	118	88,5	78,7	70,8	56,6	47,2	40,5
4,0	M	F	1,36	408	326	272	233	204	163	136	102	90,7	81,6	65,3	54,4	46,6	
XR8004 XR11004 (50)	1,0	C	M	0,91	273	218	182	156	137	109	91,0	68,3	60,7	54,6	43,7	36,4	31,2
	1,5	M	M	1,12	336	269	224	192	168	134	112	84,0	74,7	67,2	53,8	44,8	38,4
	2,0	M	M	1,29	387	310	258	221	194	155	129	96,8	86,0	77,4	61,9	51,6	44,2
	2,5	M	M	1,44	432	346	288	247	216	173	144	108	96,0	86,4	69,1	57,6	49,4
	3,0	M	M	1,58	474	379	316	271	237	190	158	119	105	94,8	75,8	63,2	54,2
4,0	M	F	1,82	546	437	364	312	273	218	182	137	121	109	87,4	72,8	62,4	
XR8005 XR11005 (50)	1,0	C	C	1,14	342	274	228	195	171	137	114	85,5	76,0	68,4	54,7	45,6	39,1
	1,5	C	M	1,39	417	334	278	238	209	167	139	104	92,7	83,4	66,7	55,6	47,7
	2,0	C	M	1,61	483	386	322	276	242	193	161	121	107	96,6	77,3	64,4	55,2
	2,5	M	M	1,80	540	432	360	309	270	216	180	135	120	108	86,4	72,0	61,7
	3,0	M	M	1,97	591	473	394	338	296	236	197	148	131	118	94,6	78,8	67,5
4,0	M	M	2,27	681	545	454	389	341	272	227	170	151	136	109	90,8	77,8	
XR8006 XR11006 (50)	1,0	C	C	1,37	411	329	274	235	206	164	137	103	91,3	82,2	65,8	54,8	47,0
	1,5	C	C	1,68	504	403	336	288	252	202	168	126	112	101	80,6	67,2	57,6
	2,0	C	M	1,94	582	466	388	333	291	233	194	146	129	116	93,1	77,6	66,5
	2,5	C	M	2,16	648	518	432	370	324	259	216	162	144	130	104	86,4	74,1
	3,0	C	M	2,37	711	569	474	406	356	284	237	178	158	142	114	94,8	81,3
4,0	C	M	2,74	822	658	548	470	411	329	274	206	183	164	132	110	93,9	
XR8008 XR11008 (50)	1,0	VC	C	1,82	546	437	364	312	273	218	182	137	121	109	87,4	72,8	62,4
	1,5	VC	C	2,23	669	535	446	382	335	268	223	167	149	134	107	89,2	76,5
	2,0	C	C	2,58	774	619	516	442	387	310	258	194	172	155	124	103	88,5
	2,5	C	C	2,88	864	691	576	494	432	346	288	216	192	173	138	115	98,7
	3,0	C	M	3,16	948	758	632	542	474	379	316	237	211	190	152	126	108
4,0	C	M	3,65	1095	876	730	626	548	438	365	274	243	219	175	146	125	
XR8010 ⁺ XR11010 ⁺	1,0			2,28	684	547	456	391	342	274	228	171	152	137	109	91,2	78,2
	1,5			2,79	837	670	558	478	419	335	279	209	186	167	134	112	95,7
	2,0			3,23	969	775	646	554	485	388	323	242	215	194	155	129	111
	2,5			3,61	1083	866	722	619	542	433	361	271	241	217	173	144	124
	3,0			3,95	1185	948	790	677	593	474	395	296	263	237	190	158	135
4,0			4,56	1368	1094	912	782	684	547	456	342	304	274	219	182	156	
XR8015 ⁺ XR11015 ⁺	1,0			3,42	1026	821	684	586	513	410	342	257	228	205	164	137	117
	1,5			4,19	1257	1006	838	718	629	503	419	314	279	251	201	168	144
	2,0			4,83	1449	1159	966	828	725	580	483	362	322	290	232	193	166
	2,5			5,40	1620	1296	1080	926	810	648	540	405	360	324	259	216	185
	3,0			5,92	1776	1421	1184	1015	888	710	592	444	395	355	284	237	203
4,0			6,84	2052	1642	1368	1173	1026	821	684	513	456	410	328	274	235	



PRODUIT PHYTOSANITAIRE DE CONTACT	PRODUIT PHYTOSANITAIRE SYSTEMIQUE	LIMITATION DE LA DERIVE
EXCELLENT	BIEN	BIEN
BIEN*	TRÈS BIEN*	TRÈS BIEN*

*À des pressions de moins de 2,0 bar (30 PSI)



Hauteur de pulvérisation optimale

Angle	Hauteur optimale (cm)
80°	75 cm
110°	50 cm

Voir les pages 173-187 pour la classification des tailles des gouttelettes, ainsi que pour certaines formules et informations utiles.

Pour passer commande :

Préciser la référence de la buse.

- Exemples :
- XR8004VS - Acier inoxydable avec code couleur Visiflo
 - XR11004-VP - Polymère avec code couleur Visiflo (angle de 110° seulement)
 - XR11004-VK - Céramique avec porte-buse code couleur Visiflo en polypropylène

Figure 34: Buses XR Teejet (Teejet Technologies, 2012)

Annexe VII Correspondances date et degré jours

La levée de Trémie est estimée par modélisation à partir du logiciel d'Arvalis, Agrobox qui indique la date du 01/11/2011. A partir de cette date, l'âge de la plante est estimé sous forme de degré jours. Le Tableau 19 ci-dessous décrit les correspondances entre la date et les degrés jours.

Tableau 19: Correspondance entre les dates et l'âge de la plante 2012

°jours	1017,9	1146,2	1302,1	1386,9	1477,3	1575,2	1723,2	1903,1
date	03-avr	19-avr	03-mai	09-mai	16-mai	23-mai	31-mai	12-juin

Annexe VIII Méthode et lignes de commandes R pour les contrastes

Chaque combinaison dose_volume peut être définie par une matrice. Cette dernière se construit à partir des contrastes et des coefficients de la régression linéaire effectuée. Pour la modalité concernée, les coefficients sont la valeur de l'intercept et l'écart à la moyenne.

Méthode :

1. Calcul du contraste L_i :

Le contraste réuni pour chaque modalité, la somme des valeurs pour les trois blocs divisée par le nombre de blocs soit la moyenne. L_i représente les facteurs par lesquels il faut multiplier les coefficients de la régression linéaire.

2. Calcul de M_i :

Multiplier la matrice L_i par les coefficients de la régression linéaire qui correspondent aux modalités concernées. M_i est l'estimation de la moyenne.

3. On calcule la valeur t_{obs} qui est le rapport entre M_i et l'erreur standard du contraste.
4. On teste la probabilité que t_{obs} soit au moins aussi grand que t théorique.

Par la suite nous détaillerons les lignes de commande pour répondre à la question 1 : Il y a-t-il un effet de la dose ?

Pour faciliter la lecture, les lignes de la régression ont été numérotées.

Régression linéaire notée $lm1$:

```
> summary(lm1)
```

Call:

```
lm(formula = x ~ fact + bloc, data = temp)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-5.2503	-1.6738	0.0192	1.9927	3.9961

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
1. (Intercept)	43.597	1.864	23.386	6.37e-15	***
2. fact[T.moitié_200]	2.783	2.407	1.156	0.262615	
3. fact[T.moitié_40]	0.450	2.407	0.187	0.853774	
4. fact[T.pleine2N_200]	2.018	2.407	0.838	0.412779	
5. fact[T.pleineDFE_200]	1.926	2.407	0.800	0.433943	
6. fact[T.quart_150]	8.033	2.407	3.338	0.003664	**
7. fact[T.quart_200]	9.655	2.407	4.012	0.000818	***
8. fact[T.quart_40]	5.548	2.407	2.305	0.033291	*

9. fact[T.quart_80]	5.225	2.407	2.171	0.043556	*
10. fact[T.zéro_0]	21.528	2.407	8.945	4.83e-08	***
11. bloc[T.2]	-8.701	1.318	-6.600	3.37e-06	***
12. bloc[T.3]	-6.227	1.318	-4.723	0.000170	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.948 on 18 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.906, Adjusted R-squared: 0.8485

F-statistic: 15.76 on 11 and 18 DF, p-value: 4.702e-07

Combinaisons dose_volume à tester :

1. 0.5_200 ; 0.25_200 soit ligne (L) 2 -L7
2. 0.5_150 ; 0.25_150 → L1-L6
3. 0.5_40 ; 0.25_40 → L3-L8

Voici le script détaillé pour le premier contraste :

```
L2=c(3,3,rep(0,8),1,1)/3
M2 <- L2%%coef(lm1)
M2
aggregate(temp$x,list(temp$fact),mean)
L7=c(3,rep(0,5),3,0,0,0,1,1)/3
M7 <- L7%%coef(lm1)
M7
aggregate(temp$x,list(temp$fact),mean)

Lvol200<-L2-L7
Mvol200 <- Lvol200%%coef(lm1)
Mvol200
var.Mvol200 <- t(Lvol200)%%vcov(lm1)%%Lvol200
var.Mvol200

tobsvol200 <- Mvol200/sqrt(var.Mvol200)
tobsvol200

pt(abs(tobsvol200), 18, lower.tail=FALSE)
2*pt(abs(tobsvol200), 18, lower.tail=FALSE)
```

La méthode se répète ainsi pour tous les autres contrastes.

Récapitulatif des contrastes effectués :

Effet dose

Volume 200 l/ha : L2 –L7

Volume 150 l/ha : L1-L6

Volume 40 l/ha : L3-L8

Effet volume :

Dose 0.25 l/ha : -3L8-L9+L6+3L7

Dose 0.5 l/ha : L1-L2 ; L3-L2 ; L3-L1

Annexe IX Validation des postulats de l'analyse de variance à 1 facteur pour l'efficacité biologique (Chapitre 1 § 2.3)

Tableau 20: Sortie R du test de Bartlett

Test de Bartlett pour l'heterocedasticité	
Facteur : combinaison des modalités dose_volume	0.6698
Facteur : bloc	0.8965

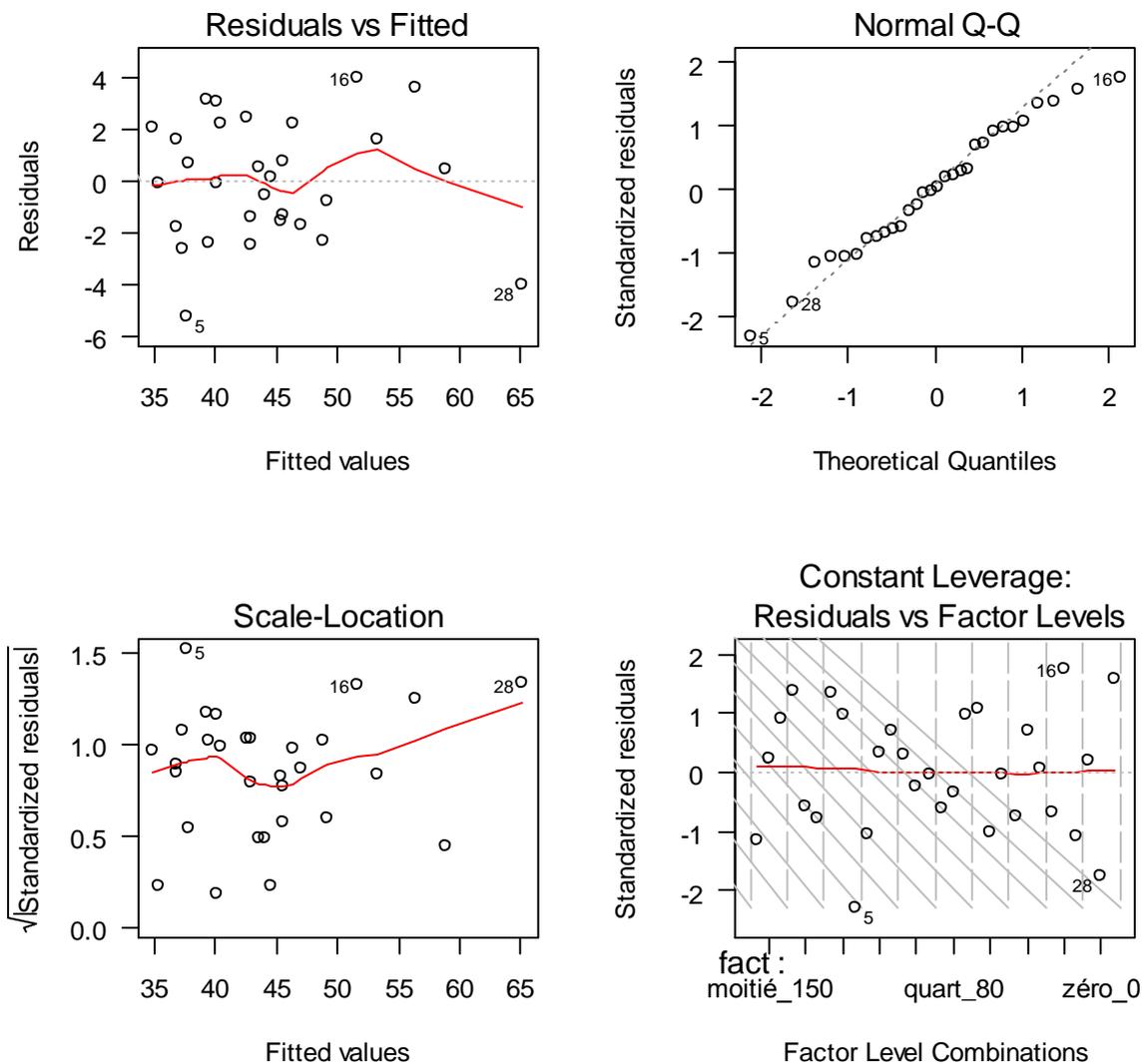


Figure 35: Validation des postulats de l'analyse de variance à 1 facteur pour l'efficacité biologique

**Annexe X Comparaisons de moyennes pour les variables PMG et rendement
(Chapitre 1 § 2.5)**

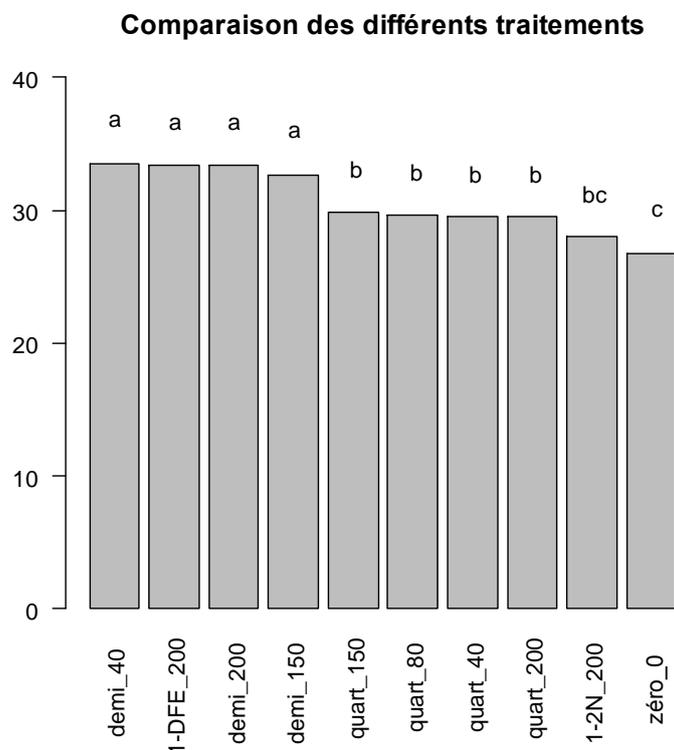


Figure 36: Test de Tukey effectué sur le PMG pour les différents traitements en fonction de la dose

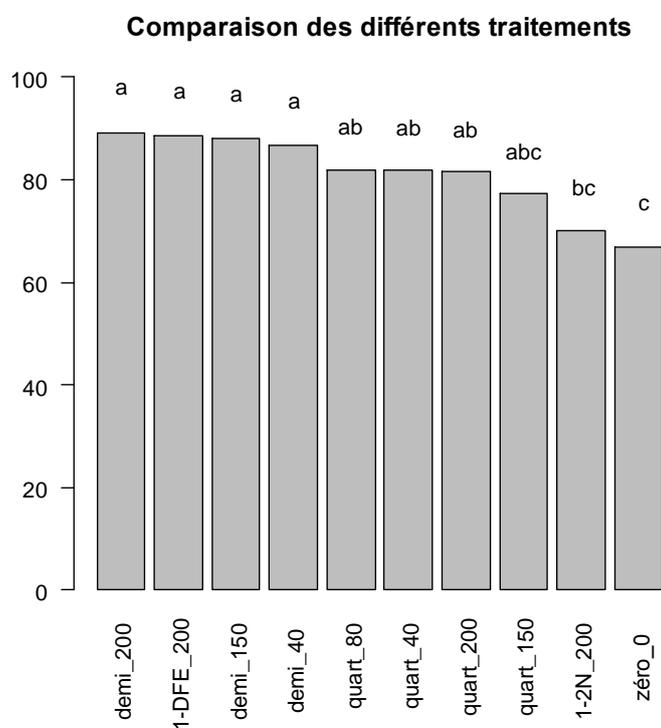


Figure 37: Comparaison des moyennes pour le rendement entre les différents traitements en fonction de la dose

Annexe XI Evaluation de la maladie, campagne 2010-2011

Progression de la maladie sur les 4 derniers étages foliaires

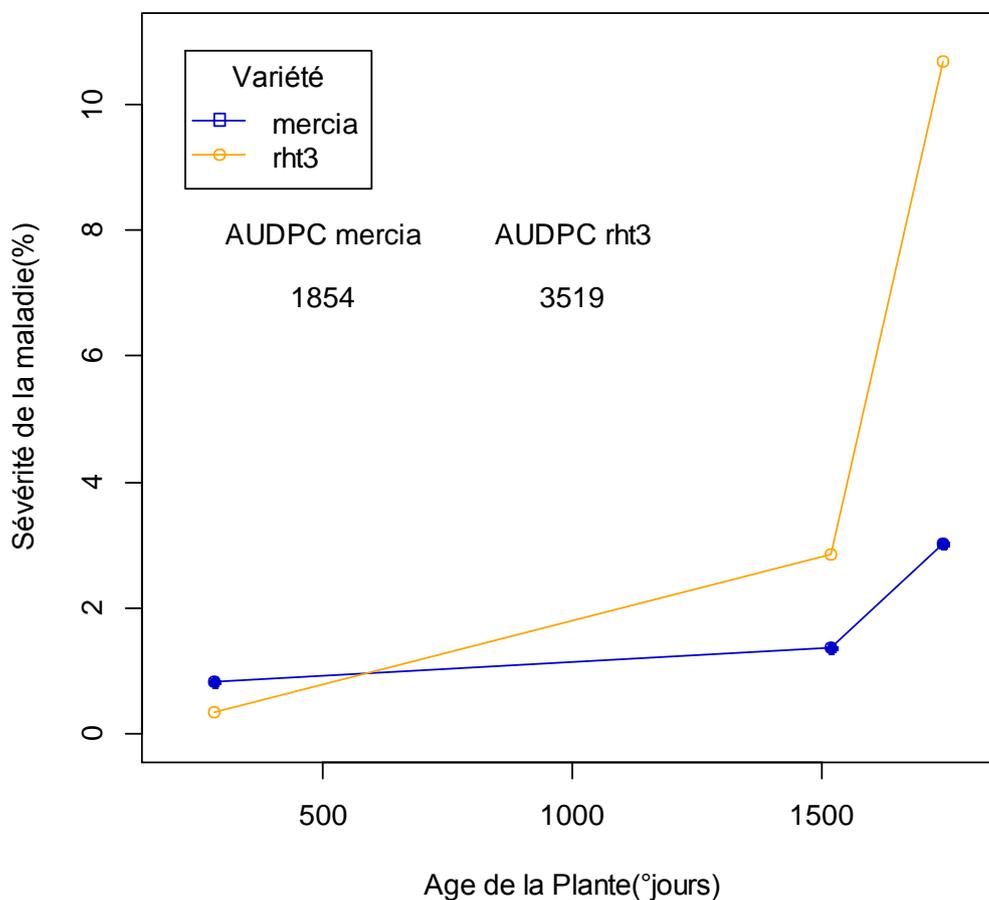


Figure 38: Dynamique de la maladie en 2011

Tableau 21: Correspondance des degrés jours aux dates (2010-2011)

°jours	date
279,8	19-11
1517,4	26-05
1744,9	09-06

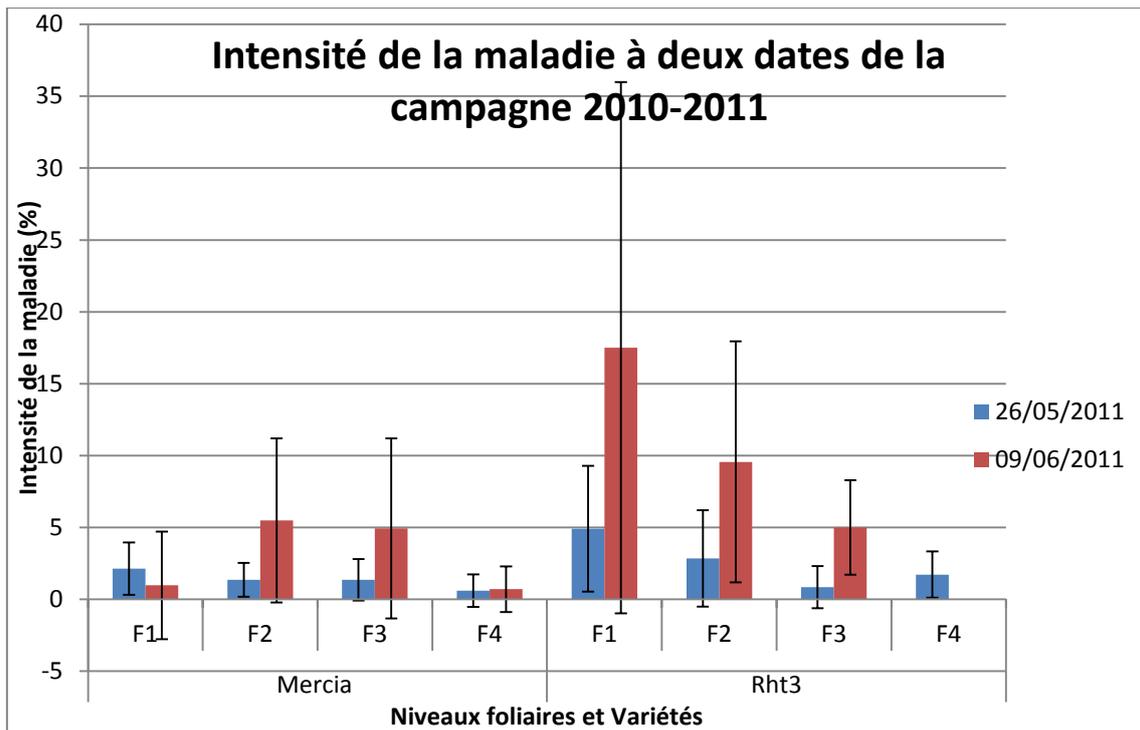


Figure 39: Sévérité de la maladie en 2011.

Annexe XII Dispositif mis en place pour les mesures d'interception foliaire



Figure 41: Boite de Pétri au sol (stade 2N)



Figure 40: Vue d'ensemble des boites de Pétri en hauteur (stade DFE)

Annexe XIII Calibration E 102 à 430 nm

THERMO ELECTRON ~ VISIONpro SOFTWARE V4.10

Opérateur C:GERVAIS Date du rapport 09/05/2011
 Département PAM Heure du rapport 16:58:48
 Organisation Poles Analytiques ARVALIS
 Information (Sans entrée)

Calibrage - Calibration E102 à 430nm du 21 avril 2011.fgc
 Opérateur C:GERVAIS
 E14900 113901

Méthode de calibrage - Calibration E102 à 430nm du 21 avril 2011.fgc

Description (Sans entrée)
 Mode dosage Simple longueur d'onde
 Longueur d'onde 1 430,00 nm Répliques 8
 Longueur d'onde 2 Non Courbe d'origine 1
 Longueur d'onde 3 Non Unités de concentration (Sans entrée)
 Tps Integ. 00:00:01 Nbre de décimales sur la conc.
 Lampe Xénon Détection Non
 Bande passante 1,5 nm Variable jusqu'à
 Etat sécurité Déverrouillé
 Gamme du coefficient Non

Tableau des étalons - Calibration E102 à 430nm du 21 avril 2011.fgc

Etalon	Conc.	Utilisé	430,0nm	Erreurs
0 mg/L	0,000	OUI	0,000	Sans
1 mg/L	1,000	OUI	0,047	Sans
2 mg/L	2,000	OUI	0,090	Sans
3 mg/L	3,000	OUI	0,135	Sans
5 mg/L	5,000	OUI	0,223	Sans
10 mg/L	10,000	OUI	0,419	Sans
15 mg/L	15,000	OUI	0,673	Sans
20 mg/L	20,000	OUI	0,895	Sans

Les calculs ont été effectués en double précision comme dans la norme ANSI/IEEE STD 754-1985 puis ont été arrondis pour l'affichage.

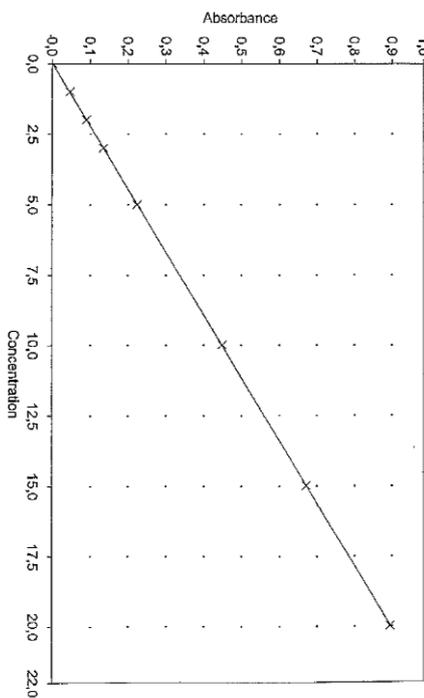
Touche erreurs
 Sans : Pas d'erreur décelée
 | : Données non valides

THERMO ELECTRON ~ VISIONpro SOFTWARE V4.10

Opérateur C:GERVAIS Date du rapport 09/05/2011
 Département PAM Heure du rapport 16:58:48
 Organisation Poles Analytiques ARVALIS
 Information (Sans entrée)

Graphique du calibrage

Calibration E102 à 430nm du 21 avril 2011.fgc Graphique du calibrage



Annexe XIV Surfaces moyennes et LAI des feuilles de blé

Tableau 22: Dimensions des feuilles en fonction de la variété et du stade

Variété	Stade	Etage foliaire	surface moyenne (cm ²)	LAI par étage foliaire
Trémie	2 nœuds	F1	28,885	1,43
		F2	27,66	2,79
		F3	21,475	3,84
		F4	14,395	4,55
		tige	62,832	7,64
	DFE	F1	18,89	0,93
		F2	30,16	2,42
		F3	25,49	3,67
		F4	19,647	4,64
		tige	94,247	9,28
Mercia	2 nœuds	F1	25,63	1,01
		F2	20,11	1,8
		F3	11,56	2,25
		F4	NA	NA
		tige	NA	NA
	DFE	F1	22,909	0,9
		F2	32,479	2,18
		F3	29,068	3,32
		F4	19,486	4,08
		tige	NA	NA
Rht3	2 nœuds	F1	20,24	0,69
		F2	16,09	1,23
		F3	9,91	1,57
		F4	NA	NA
		tige	NA	NA
	DFE	F1	20,911	0,71
		F2	27,968	1,66
		F3	23,172	2,44
		F4	15,133	2,95
		tige	NA	NA

Tableau 23: LAI calculé à partir des trois ou quatre dernières feuilles

Variété	LAI	
	2N	DFE
Mercia	2,25	4,07
Rht3	1,57	2,95
Trémie	4,55	4,62
Trémie avec tige	7.6	9.2

Annexe XV Proportion de la quantité de tartrazine retenue sur le blé aux stades 2N et DFE

Tableau 24: Quantité de Tartrazine retenue en fonction de la variété, du stade et du volume

Variété	Stade	Volume	Quantité retenue (%)
Trémie	2 nœuds	40	65,572
		80	56,646
		150	45,235
		200	44,477
	DFE	40	79,124
		80	68,546
		150	62,108
		200	78,831
Mercia	2 nœuds	40	16,552
		80	13,828
		150	13,946
		200	11,794
	DFE	40	13,375
		80	14,049
		150	14,225
		200	12,758
Rht3	2 nœuds	40	22,777
		80	19,894
		150	25,800
		200	24,758
	DFE	40	21,856
		80	17,046
		150	19,156
		200	20,237

**Annexe XVI Sorties R de l'ANOVA à deux facteurs (Volume et Stade)
(chapitre 2 § 2.3)**

```
> aovC1=aov(rapport.moyen~Stade*volume+bloc, data=IFtot)
> summary(aovC1)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Stade	1	7.180e-09	7.180e-09	47.937	0.000226	***
volume	3	3.016e-09	1.005e-09	6.711	0.018146	*
bloc	1	2.900e-11	2.900e-11	0.194	0.672614	
Stade:volume	3	1.256e-09	4.190e-10	2.795	0.118660	
Residuals	7	1.049e-09	1.500e-10			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe XVII Validation des Postulats de l'ANOVA à deux facteurs (Volume et Stade) (chapitre 2 § 2.3)

Tableau 25: Sortie R du test de Bartlett

Facteur	Probabilité critique
Volume	0.47
Stade	0.08
Bloc	0.99

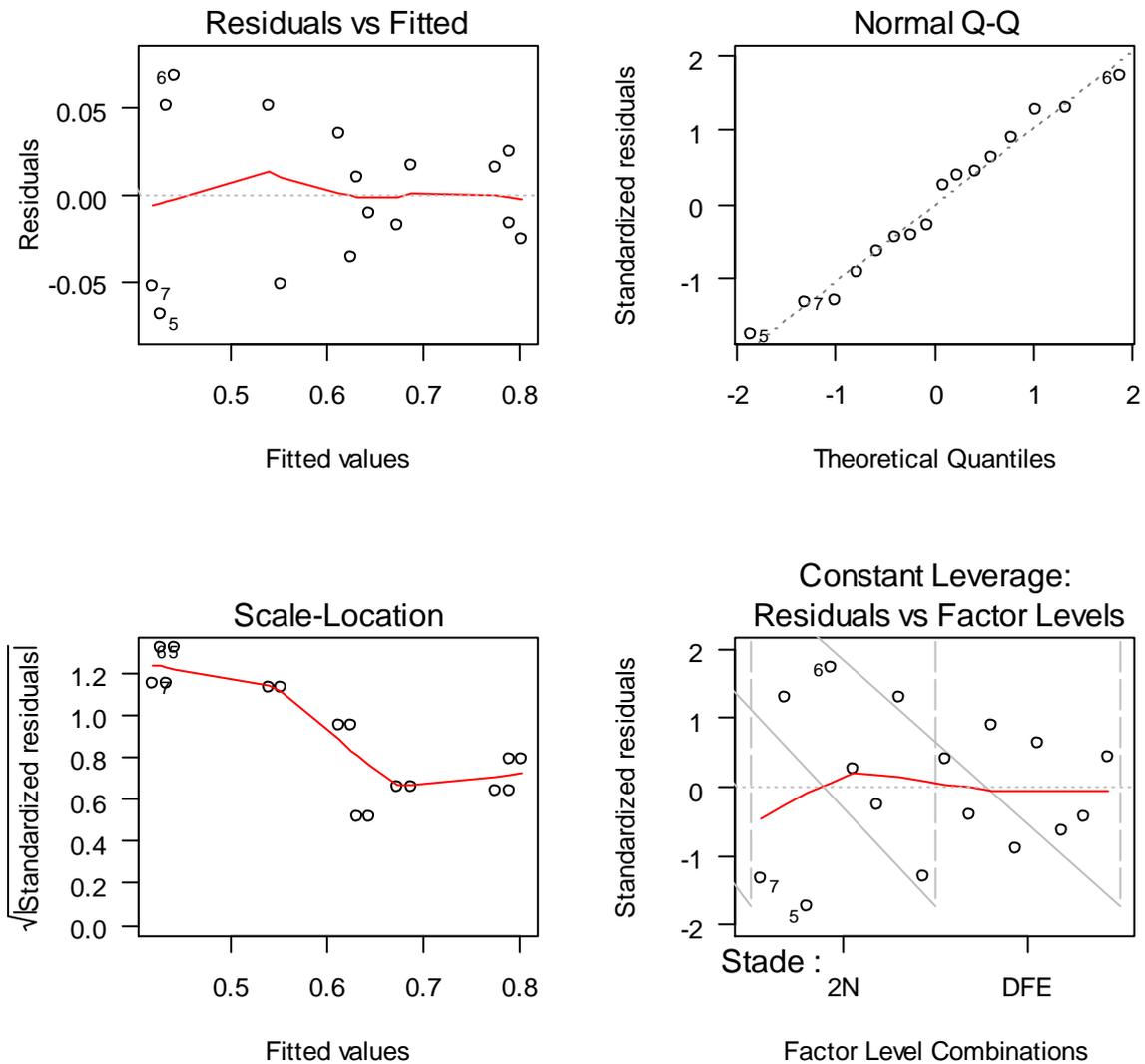


Figure 42: Validation graphique des postulats de l'analyse de variance à deux facteurs pour la variable interception

**Annexe XVIII Résultats ANOVA à trois facteurs (Niveau, Volume, Stade)
(chapitre 2 § 2.4)**

```
aovC2=aov(sqrt(Quantité.déposée.en.ng.cm2.de.feuille.par.g.ha.de.c  
olorant.appli)~ Stade*volume*niveau + bloc, data=ngTré)
```

```
> summary(aovC2)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Stade	1	0.173	0.1727	16.844	0.000200	***
volume	3	0.254	0.0847	8.259	0.000224	***
niveau	4	5.599	1.3996	136.480	< 2e-16	***
bloc	1	0.018	0.0179	1.742	0.194584	
Stade:volume	3	0.078	0.0261	2.544	0.070090	.
Stade:niveau	4	1.323	0.3308	32.256	6.83e-12	***
volume:niveau	12	0.021	0.0018	0.174	0.998816	
Stade:volume:niveau	12	0.076	0.0064	0.620	0.812192	
Residuals	39	0.400	0.0103			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe XIX Validation des postulats de l'ANOVA à trois facteurs (Niveau, Stade, Volume) (chapitre 2 § 2.4)

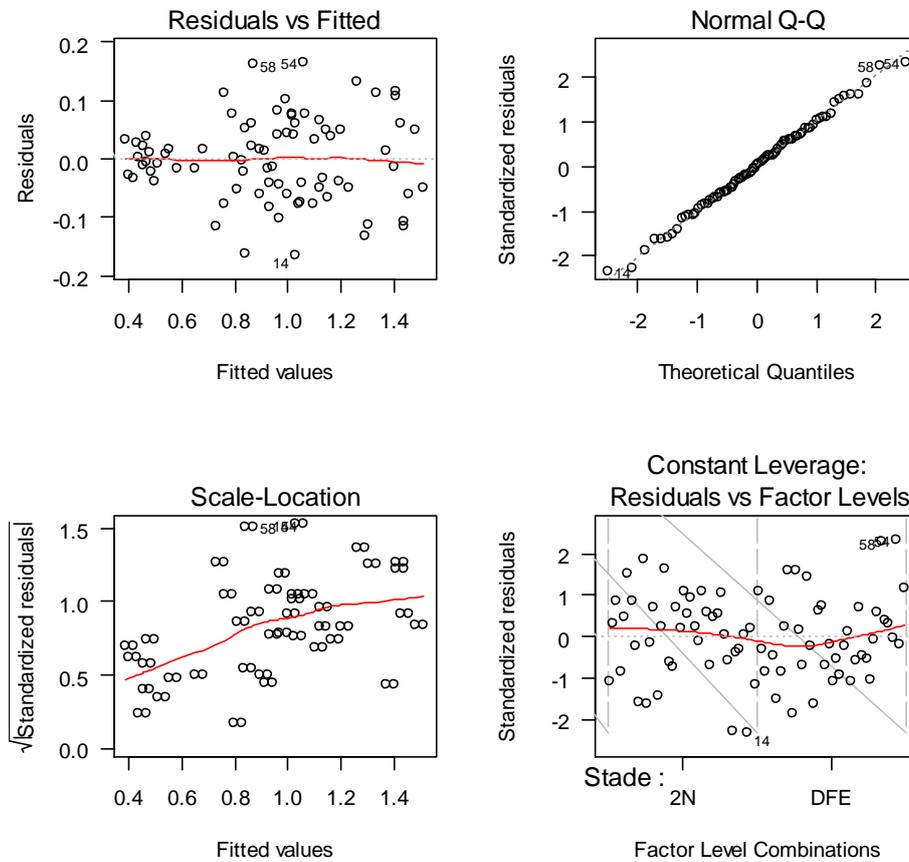


Figure 43: Validation graphique des postulats de l'analyse de variance à trois facteurs sur la variable interception

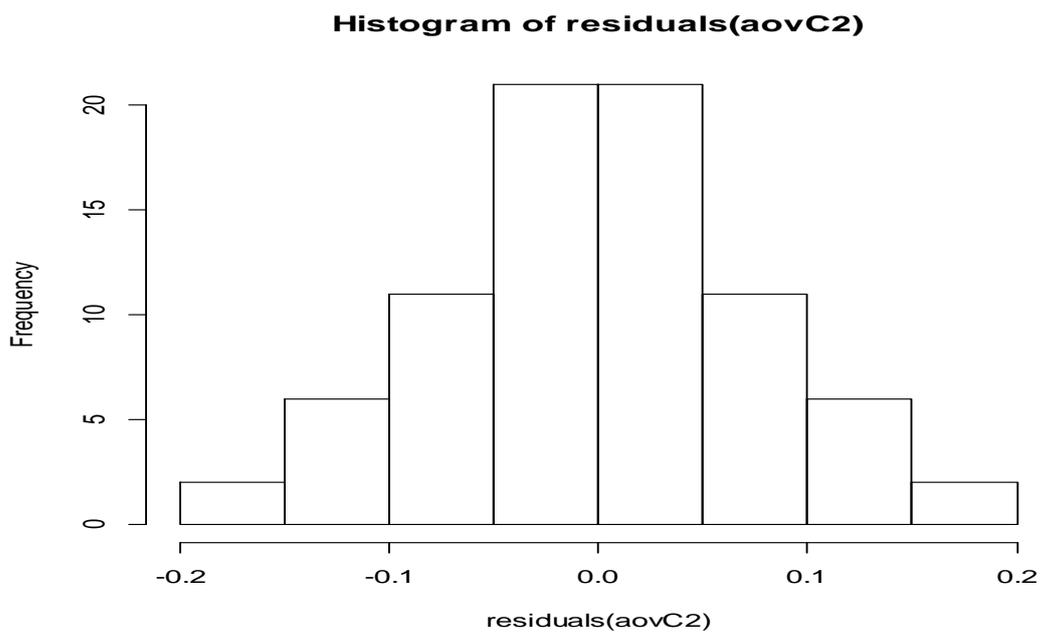


Figure 44: Histogramme de fréquence des résidus

**Annexe XX Test de Tukey comparaison des moyennes pour l'interaction
Stade : Niveau (chapitre 2 § 2.4)**

En fonction des stades :

⇒ Stade 2N :

Comparaison des différents niveaux foliaires pour le stade 2N

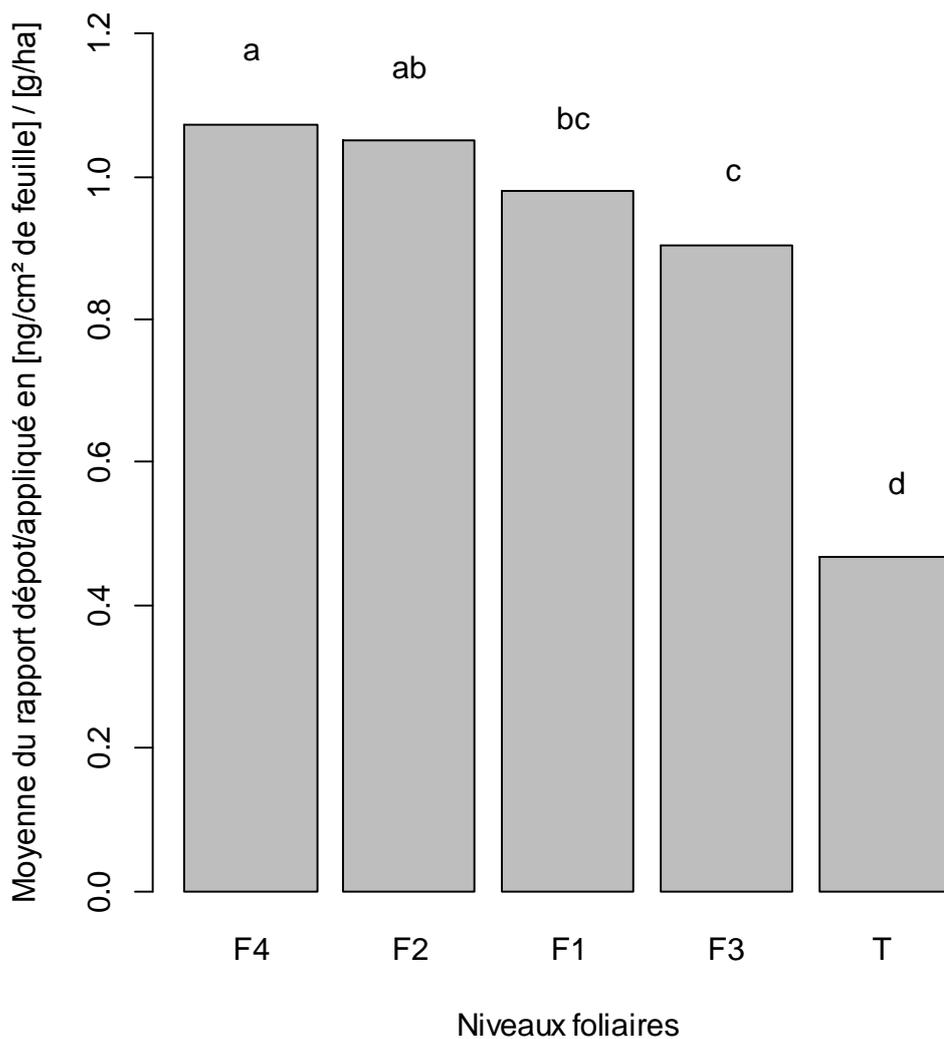


Figure 45: Comparaison des différents niveaux foliaires pour le stade 2N

→ Stade DFE :

Comparaison des différents niveaux foliaires pour le stade DFE

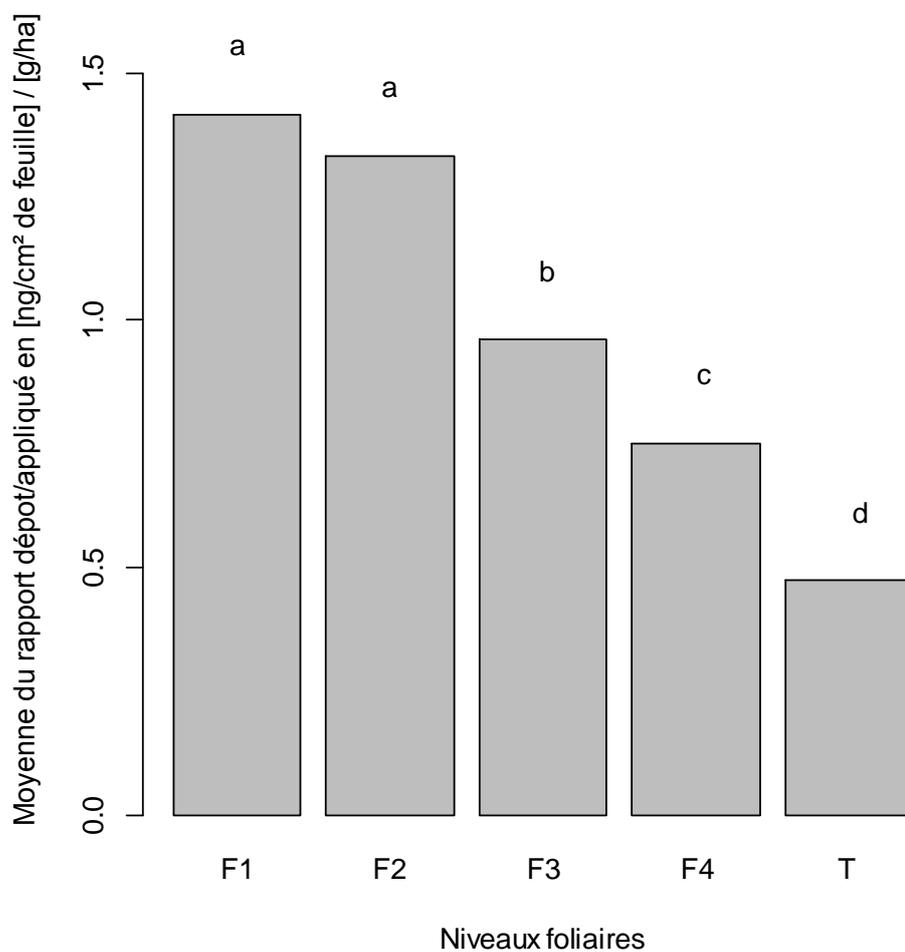


Figure 46: Comparaison des différents niveaux foliaires pour le stade DFE

En fonction des niveaux foliaires

Tableau 26: Comparaison des différents stades en fonction des niveaux foliaires

Niveau Foliaire	Classes et moyennes pour la variable Stade		
F1	a	DFE	1.416
	b	2N	0.981
F2	a	DFE	1.330
	b	2N	1.050
F3	a	DFE	0.963
	a	2N	0.903
F4	a	2N	1.0718
	b	DFE	0.752
Tige	a	DFE	0.476
	a	2N	0.4670

Annexe XXI Equations des différents modèles d'interception foliaire

Tableau 27: Les modèles de régression linéaire avec ordonnée à l'origine

Modèle	Coefficient de pente	Ordonnée à l'origine	R ² ajusté
Simple	-0.14955	0.07861	0.4773
Complet variété			
- Mercia	-0.03147	-0.02647	0.8014
- Rht3	-0.07281		
- Trémie	-0.16531		
Complet Volume			
- V40	-0.16628	0.07861	0.4726
- V80	-0.14696		
- V150	-0.13348		
- V200	-0.15148		
Complet Stade			
- DFE	-0.15023	0.07887	0.4712
- 2N	-0.14926		
Complet Variété et Stade			
- variétéMercia:Stade2N	-0.073906	0.018987	0.9343
- variétéRht3:Stade2N	-0.172432		
- variétéTrémie:Stade2N	-0.135709		
- variétéMercia:StadeDFE	-0.040869		
- variétéRht3:StadeDFE	-0.076637		
- variétéTrémie:StadeDFE	-0.224135		
Complet Variété et Volume			
- variétéMercia:volume40	-0.03103	-0.02647	0.8067
- variétéRht3:volume40	-0.07619		
- variétéTrémie:volume40	-0.19389		
- variétéMercia:volume80	-0.03321		
- variétéRht3:volume80	-0.06176		
- variétéTrémie:volume80	-0.16279		
- variétéMercia:volume150	-0.03407		
- variétéRht3:volume150	-0.07502		
- variétéTrémie:volume150	-0.13539		
- variétéMercia:volume200	-0.02755		
- variétéRht3:volume200	-0.07829		
- variétéTrémie:volume200	-0.16919		
Complet Volume et Stade			
- volume40:Stade2N	-0.18566	0.07887	0.4666
- volume80:Stade2N	-0.15821		
- volume150:Stade2N	-0.13209		
- volume200:Stade2N	-0.12495		
- volume40:StadeDFE	-0.15408		

-	volume80:StadeDFE	-0.13993		
-	volume150:StadeDFE	-0.13451		
-	volume200:StadeDFE	-0.1685		
Complet Volume, Stade et Variété				
-	volume40:Stade2N:variété MERCIA	-0.084069		
-	volume80:Stade2N:variétéMERCIA	-0.073968		
-	volume150:Stade2N:variétéMERCIA	-0.075707		
-	volume200:Stade2N:variétéMERCIA	-0.061880		
-	volume40:StadeDFE:variétéMERCIA	-0.037469		
-	volume80:StadeDFE:variétéMERCIA	-0.043084		
-	volume150:StadeDFE:variétéMERCIA	-0.043696		
-	volume200:StadeDFE:variétéMERCIA	-0.039229		
-	volume40:Stade2N:variétéRHT3	-0.168321		
-	volume80:Stade2N:variétéRHT3	-0.147610		
-	volume150:Stade2N:variétéRHT3	-0.190053		
-	volume200:Stade2N:variétéRHT3	-0.183742	0.018987	0.9887
-	volume40:StadeDFE:variétéRHT3	-0.081869		
-	volume80:StadeDFE:variétéRHT3	-0.068992		
-	volume150:StadeDFE:variétéRHT3	-0.075024		
-	volume200:StadeDFE:variétéRHT3	-0.080664		
-	volume40:Stade2N:variétéTREMIE	-0.180221		
-	volume80:Stade2N:variétéTREMIE	-0.148551		
-	volume150:Stade2N:variétéTREMIE	-0.109960		
-	volume200:Stade2N:variétéTREMIE	-0.104106		
-	volume40:StadeDFE:variétéTREMIE	-0.235341		
-	volume80:StadeDFE:variétéTREMIE	-0.204856		
-	volume150:StadeDFE:variétéTREMIE	-0.189665		
-	volume200:StadeDFE:variétéTREMIE	-0.266679		

Tableau 28: Modèle retenu : complet par Volume par Stade et par Variété sans ordonnée à l'origine

Modèle completVolumeStadeVariété	Coefficient de pente (-k)	R ² ajusté
- volume40:Stade2N:variétéMERCIA	-0.073738	0.994
- volume80:Stade2N:variétéMERCIA	-0.063637	
- volume150:Stade2N:variétéMERCIA	-0.065376	
- volume200:Stade2N:variétéMERCIA	-0.051548	
- volume40:StadeDFE:variétéMERCIA	-0.031469	
- volume80:StadeDFE:variétéMERCIA	-0.037084	
- volume150:StadeDFE:variétéMERCIA	-0.037696	
- volume200:StadeDFE:variétéMERCIA	-0.033229	
- volume40:Stade2N:variétéRHT3	-0.153433	
- volume80:Stade2N:variétéRHT3	-0.132722	
- volume150:Stade2N:variétéRHT3	-0.175165	
- volume200:Stade2N:variétéRHT3	-0.168854	
- volume40:StadeDFE:variétéRHT3	-0.073656	
- volume80:StadeDFE:variétéRHT3	-0.060779	
- volume150:StadeDFE:variétéRHT3	-0.066811	
- volume200:StadeDFE:variétéRHT3	-0.072452	
- volume40:Stade2N:variétéTREMIE	-0.174930	
- volume80:Stade2N:variétéTREMIE	-0.143259	
- volume150:Stade2N:variétéTREMIE	-0.104668	
- volume200:Stade2N:variétéTREMIE	-0.098814	
- volume40:StadeDFE:variétéTREMIE	-0.230017	
- volume80:StadeDFE:variétéTREMIE	-0.199532	
- volume150:StadeDFE:variétéTREMIE	-0.184341	
- volume200:StadeDFE:variétéTREMIE	-0.261355	

Annexe XXII Valeurs prédites par le modèle en fonction des valeurs observées : adéquation avec la bissectrice

- Stade 2N

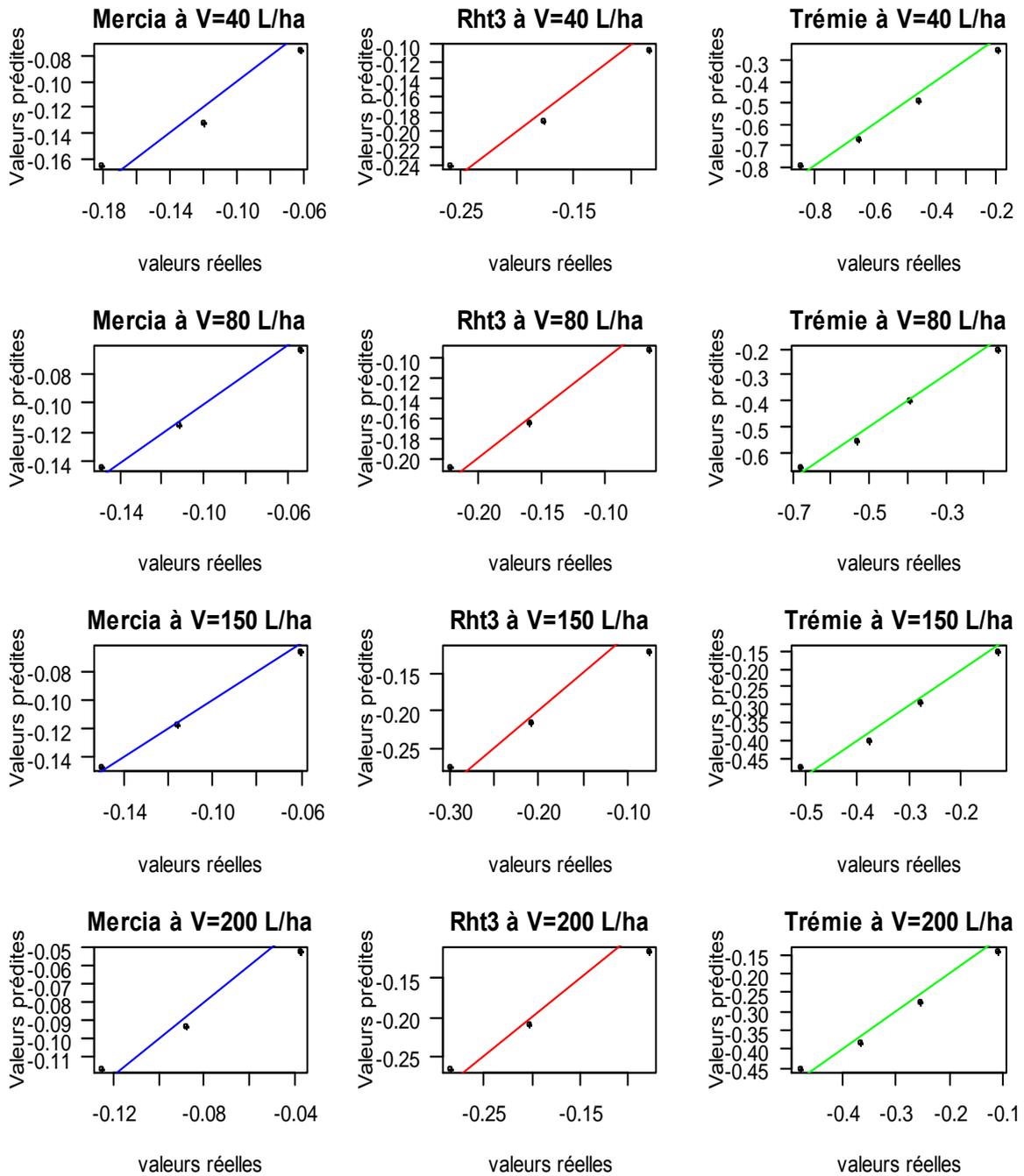


Figure 47: Validation du modèle (stade 2N)

- Stade DFE

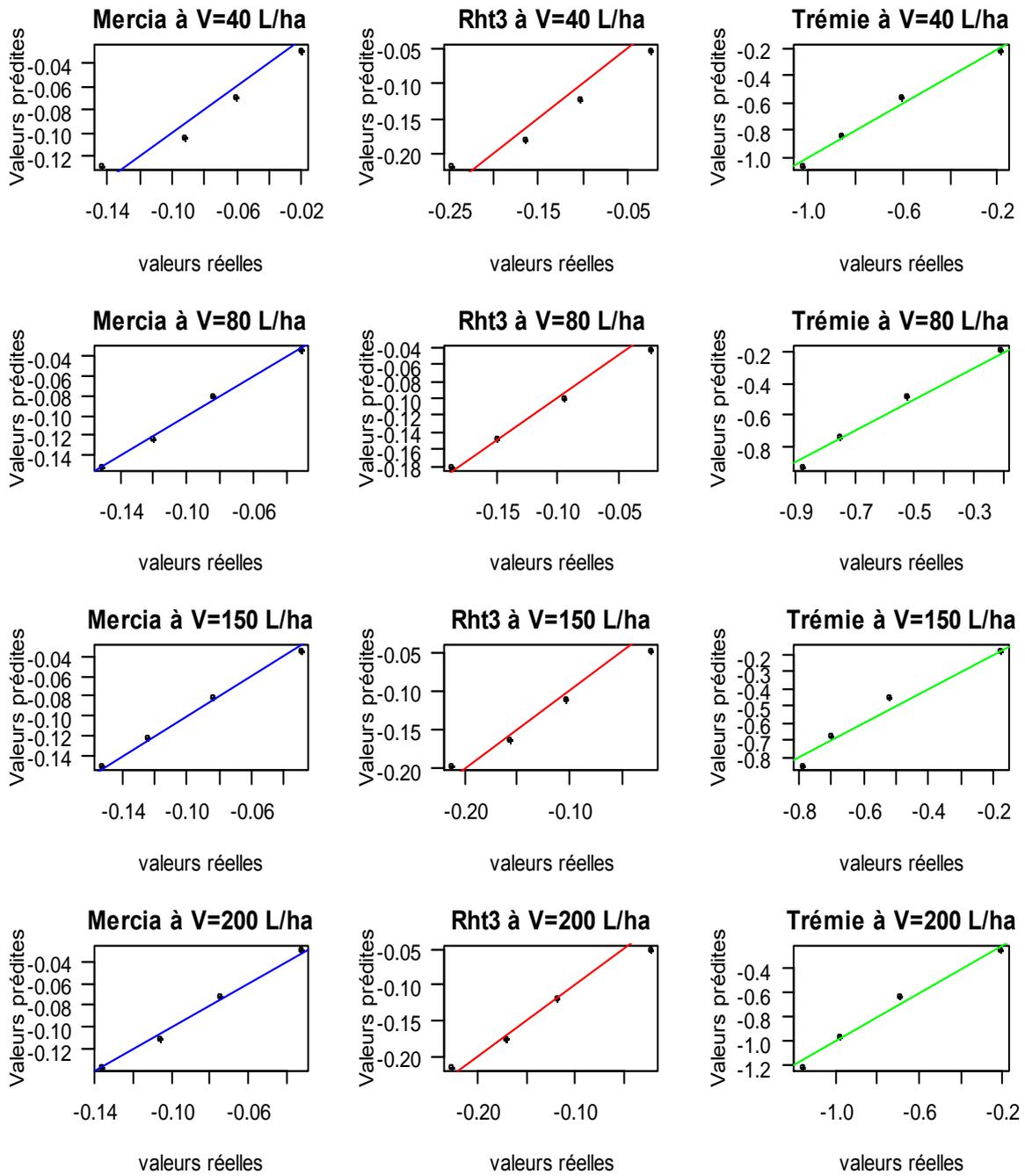


Figure 48: Validation du modèle (stade DFE)

Annexe XXIII Exemples de dépôts de cires épicuticulaires

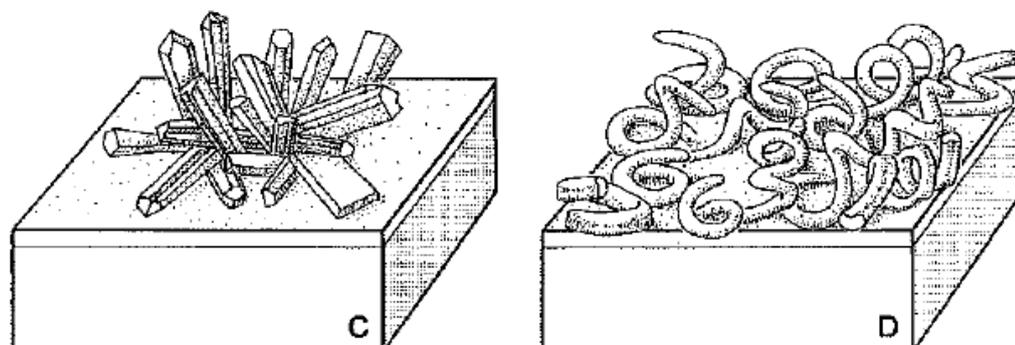


Figure 49: Bâtonnets polygonaux (C), bâtonnets enroulés (D) (Barthlott et al., 1998)

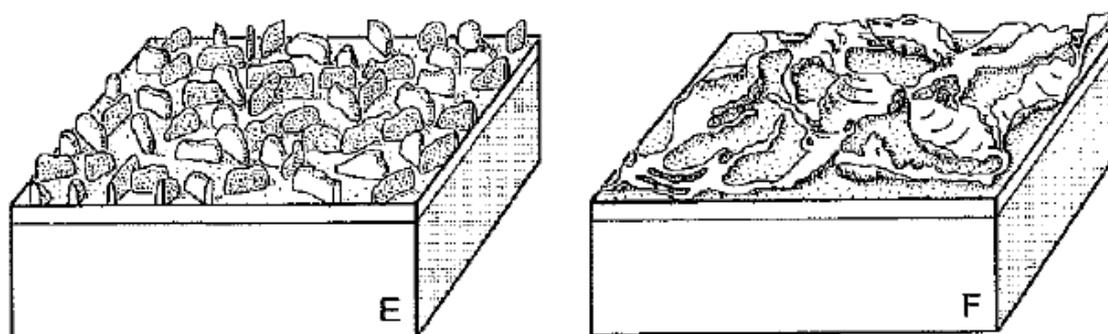


Figure 50: Plaquettes (E), plaquettes membraneuses (F) (Barthlott et al., 1998)

Annexe XXIV Comparaison de la géométrie des feuilles entre stades pour Trémie



Figure 51: Port de plante au stade DFE, variété Trémie. Cadre noir de dimension 30x80 cm



Figure 52: Port de plantes au stade 2N, variété Trémie. La ligne blanche horizontale mesure 60 cm

Annexe XXV Conditions d'application de la tartrazine au stade DFE

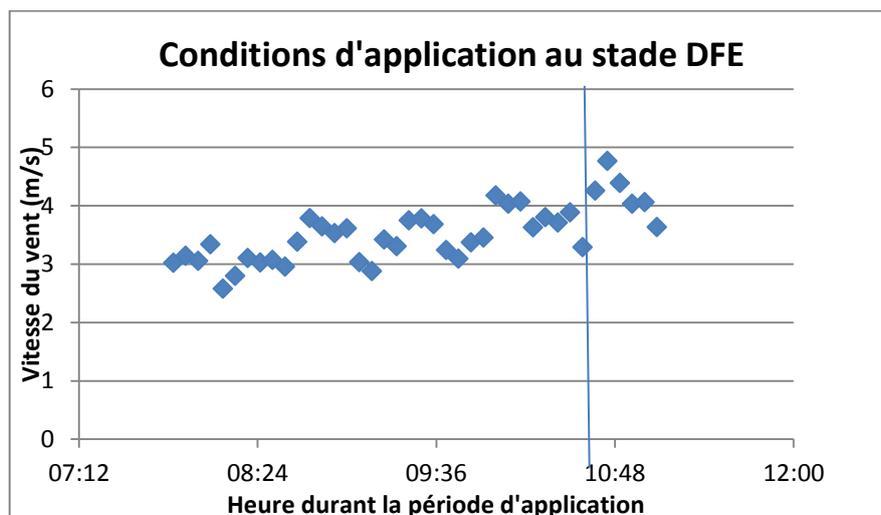


Figure 53: Vitesse du vent en fonction du temps au moment du traitement à la tartrazine au stade DFE

L'ordre des traitements est le suivant :

- 40 l/ha
- 80 l/ha
- 150 l/ha
- 200 l/ha

La droite représente le moment à partir duquel on considère avoir traité les deux blocs au volume de bouillie 200 l/ha.

L'idéal est d'appliquer un produit tôt le matin afin d'avoir des conditions climatiques optimales (forte hygrométrie et absence de vent). Cependant il est aussi indispensable d'éviter la rosée. En effet, les gouttelettes de pulvérisation sont moins bien retenues par des feuilles mouillées (Gauvrit, 1996). Lors du deuxième traitement à la tartrazine, la rosée était importante et il a fallu traiter tardivement dans la journée. Or, ceci a joué en faveur d'un vent plus important en particulier lors de l'application à 200 l/ha.

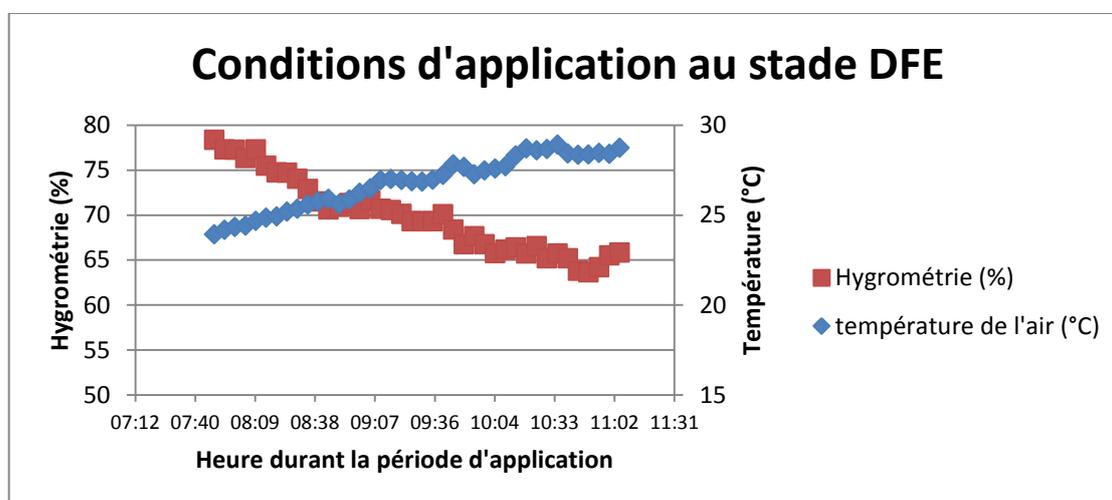


Figure 54: Hygrométrie et température au moment du traitement à la tartrazine au stade DFE

Annexe XXVI Résultats de la campagne 2010- 2011

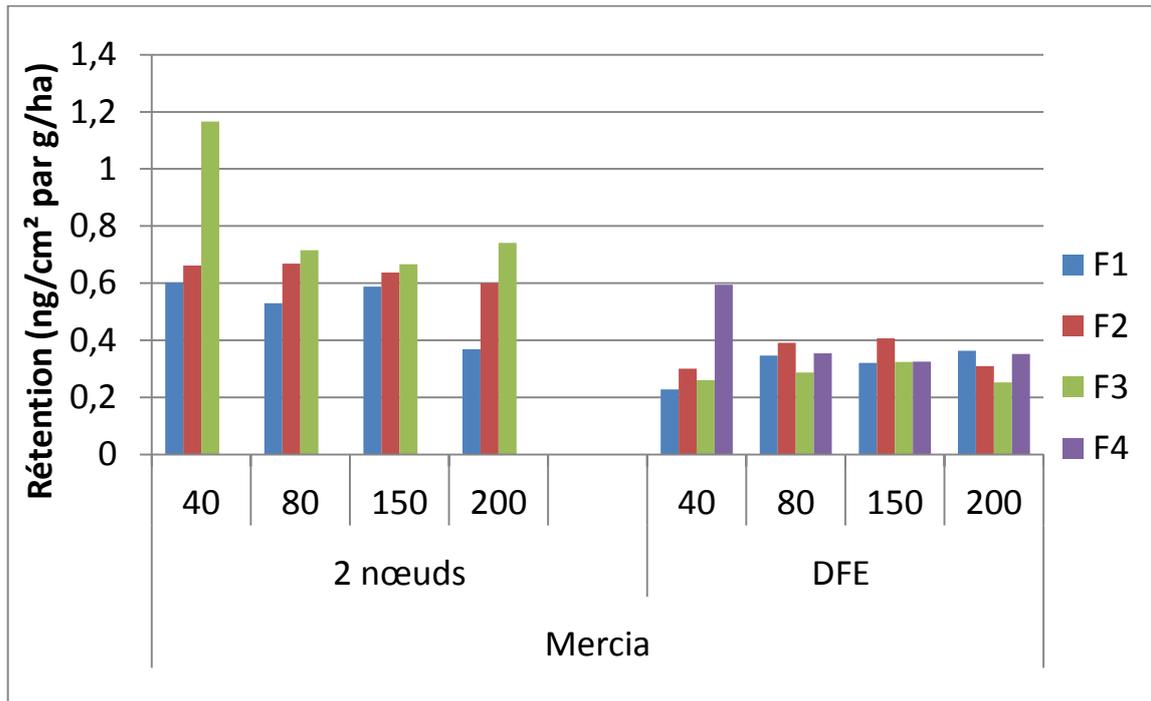


Figure 55: Quantité déposée en ng/cm²de feuille par g/ha de colorant appliqué à la parcelle élémentaire pour la variété Mercia

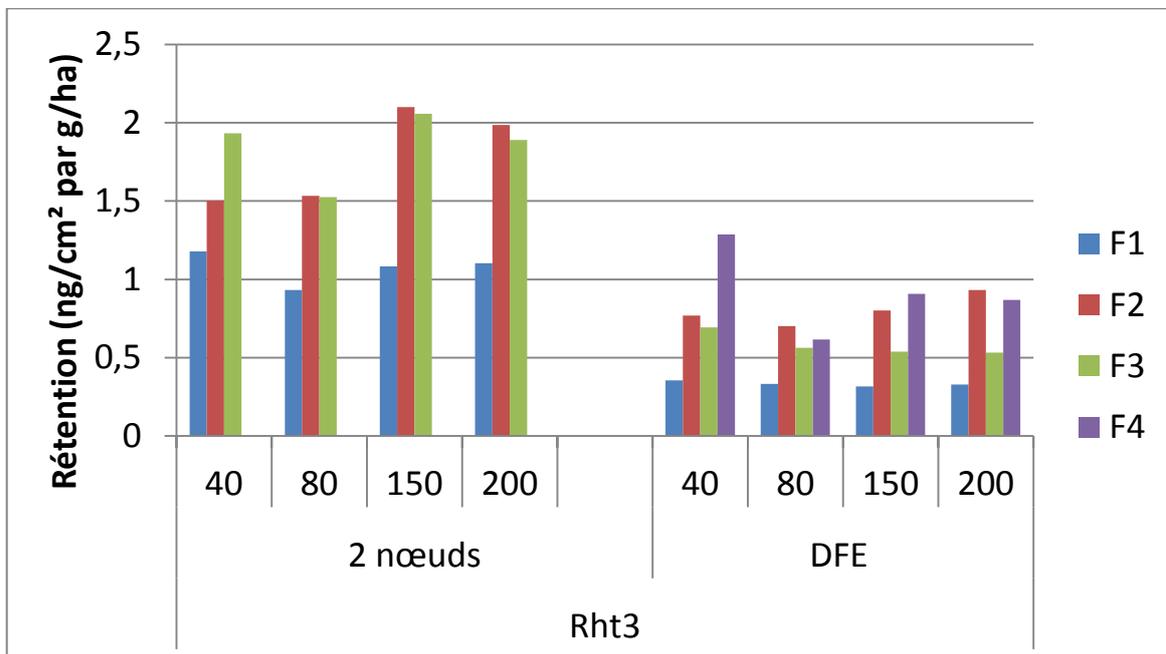


Figure 56: Quantité déposée en ng/cm²de feuille par g/ha de colorant appliqué à la parcelle élémentaire pour la variété Rht3

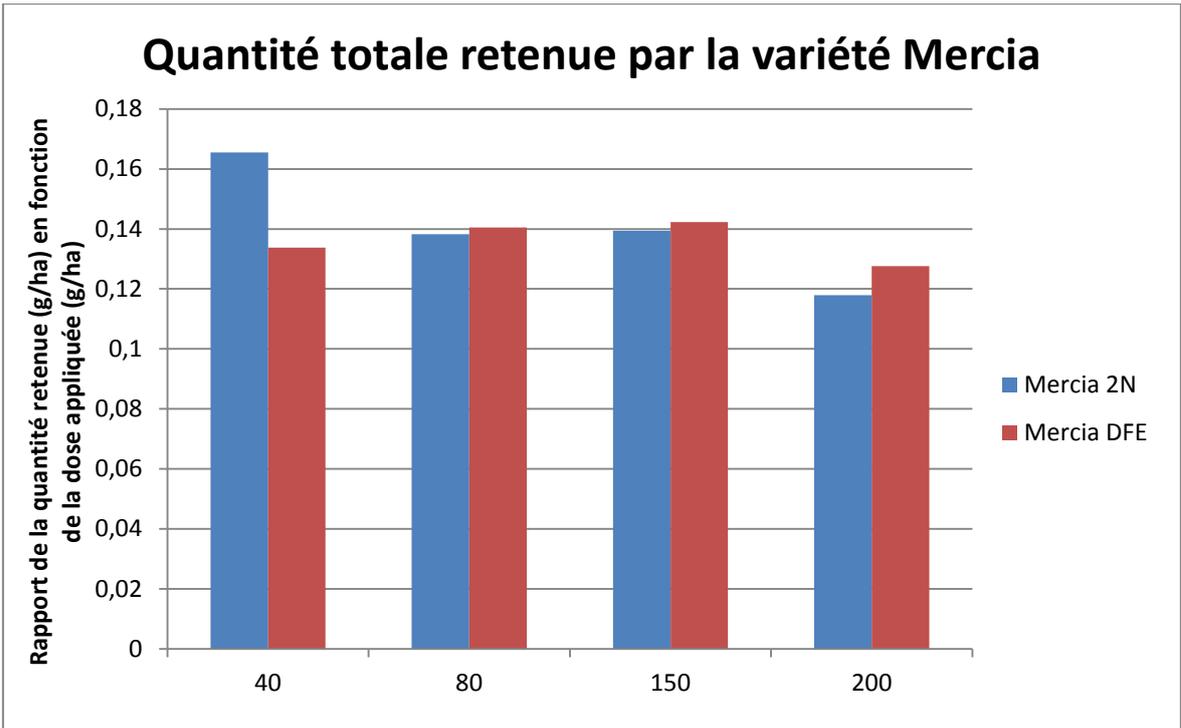


Figure 57: Quantité totale retenue par la variété Mercia




Figure 58: Quantité totale retenue par la variété Rht3



Diplôme : Ingénieur Agronome
Spécialité : Sciences et Productions Végétales
Spécialisation / option : Ingénierie des Agrosystèmes
Enseignant référent : Dominique Poulain

Auteur(s) : Jessica Da Costa

Date de naissance : 17 -10- 1988

Organisme d'accueil : ARVALIS-Institut du Végétal

Adresse : Station Expérimentale, 91720, Boigneville

Nb pages : 40 p. Annexe(s) : 39 p.

Année de soutenance : 2012

Maître de stage : Benjamin Perriot

Titre français :

Influence de l'architecture du couvert de blé et de la techniques de pulvérisation à bas volume sur l'interception foliaire du fongicide et le développement de *Septoria tritici*.

Titre anglais :

Influence of canopy architecture of wheat and low-volume spraying techniques in fungicide spray interception on foliage and development of *Septoria tritici*

Résumé :

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet ECHAP: « Réduire l'utilisation des fongicides en associant stratégies de traitements optimales et couverts ECHAPpants aux maladies ». L'objectif est de combiner des techniques de lutte innovantes afin de dégager des stratégies de protection contre les bioagresseurs. Le dispositif mis en place vise à identifier les paramètres architecturaux du blé qui influencent le développement épidémique de *S. tritici* mais aussi à valider l'hypothèse des techniques d'application raisonnées sur le principe du bas volume et l'optimisation des doses. Pour cela, il a été prévu d'étudier l'interface fongicide-champignon via un essai fongicide ainsi que l'interface fongicide-feuille via des mesures d'interception foliaire en utilisant un traceur.

Les résultats montrent plus de rétention pour la technique du bas volume par rapport aux volumes conventionnels bien que cela ne se traduise pas par une augmentation de l'efficacité biologique. La réduction des doses accroît considérablement le niveau de maladie et affecte le poids de mille grains. Les résultats ont également montré de grandes différences de dépôts entre deux stades de croissance, respectivement 32 et 39 (échelle Zadoks). La rétention à un stade donné dépend de la variété et/ou des conditions climatiques (il n'a pas été possible de dissocier ces deux critères). Les dépôts foliaires diffèrent entre les strates foliaires. La rétention entre les strates semble être liée à la densité du couvert, mais doit être prise en compte séparément pour chaque volume de pulvérisation, variété et stade phénologique.

Abstract :

This internship is part of the ECHAP project: «Reducing the use of fungicides by combining optimal treatment strategies with crops that can "escape" to diseases». The goal is to combine innovative control techniques to identify strategies for protection against pests. The system set up aims to identify the architectural parameters that influence the epidemic development of *S. tritici* but also to validate the hypothesis of reasoned application techniques which include the principle of low volumes and dose optimization. To do so, studies were conducted to consider the interface fungus-fungicide by testing a fungicide trial and the interface fungicide-wheat leaves through measurements of foliar retention by using a tracer.

The results showed more retention of low-volume sprays in comparison to conventional spraying techniques even though it doesn't seem to increase the biological efficacy. However reduction in doses severely increased disease levels and affected thousand grain weight. Results also showed large differences in mean deposits at two growth stages respectively 32 and 39 GSZ. Retention at a certain growth stage depends on weather conditions and/or the variety (it was not possible to dissociate these two criteria). Leaf deposits differed from one leaf stratus to another. Spray retention between strata seems to be related to crop density but needs to be considered separately for each spray volume, variety and growth stage.

Mots-clés : Bas volume, pulvérisation, architecture du couvert, interaction feuille-fongicide, LAI, blé tendre d'hiver, dépôt traceur, niveau foliaire, septoriose, modèle interception foliaire, rétention, cires épicuticulaires, tartrazine

