HAL open science

# Moucheture du blé dur : identification des facteurs et gestion du risque

Sophie Chau

## To cite this version:

Sophie Chau. Moucheture du blé dur : identification des facteurs et gestion du risque. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02363161

**HAL Id: dumas-02363161**

**https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02363161**

Submitted on 14 Nov 2019

**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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

**AGROCAMPUS OUEST**

☐ **CFR Angers**

☒ **CFR Rennes**

| | |
|---|---|
| Année universitaire : 2018-2019<br>Master Biologie, Agrosciences<br>Parcours Amélioration, Production, Valorisation du végétal<br>Option : Fonctionnement et Gestion des Agrosystèmes (FGA) | **Rapport de stage**<br>☐ D'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage<br>☑ De Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage<br>☐ D'un autre établissement (étudiant arrivé en M2) |

# Moucheture du blé dur : Identification des facteurs et gestion du risque

Par : Sophie CHAU

© ARVALIS – Institut du végétal

© Intercéréales

***Soutenu à Agrocampus Ouest, Rennes le 27 juin 2019***

***Devant le jury composé de :***

Président : Matthieu CAROF

Autres membres du jury : Florence VAL

Maître de stage : Matthieu KILLMAYER

Enseignant référent : Olivier GODINOT

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celles d'AGROCAMPUS OUEST et l'université de Rennes 1*

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
« Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France »
disponible en ligne h ttp://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/de

## Remerciements :

*Je tiens à remercier Matthieu KILLMAYER de m'avoir encadré et guidé tout au long de ce stage, et notamment pour sa patience et son enthousiasme toujours au rendez-vous. Je le remercie d'avoir été disponible lors de mes nombreuses interrogations.*

*Je remercie tous les membres du comité de suivi et de pilotage de m'avoir conseillé à savoir : Jean Philippe LEYGUE, Delphine HOURCADE, Romain VALADE, Delphine AUDIGEOS ....et surtout Florent DUYME de m'avoir épaulé pour toute la partie statistiques.*

*Enfin merci à toutes les personnes de la station Inter-instituts de Baziège pour leur accueil et leur gentillesse. Notamment mes collègues de bureaux pour leur bonne humeur au quotidien : Gwenou, Coco, Dihia, et sans oublier la bonne humeur du bureau d'à côté notamment les fous rires d'Imen et ceux qui en sont responsables (surtout Eve Anna ;))*

## Table des matières :


I) *Introduction* ..... 2

*II) Synthèse bibliographique* ..... 2

*1) Une définition de la moucheture qui varie selon les contextes* ..... 2

*2) Les facteurs biotiques impliqués dans la moucheture* ..... 3

- a) L'influence des champignons sur la moucheture ..... 3
- b) Une implication différente des espèces de champignon dans l'apparition de la moucheture ..... 3
- c) Remise en cause de l'influence des champignons sur la moucheture ..... 4
- d) Une variabilité génétique de la résistance à la moucheture ..... 4

*3) Les facteurs abiotiques impliqués dans la moucheture* ..... 5

- a) Influence de l'humidité et de la température sur la moucheture ..... 6
- b) Etude de la fenêtre de sensibilité à la moucheture ..... 6
- c) Implication des pratiques culturales ..... 7

*III) Matériel et méthodes* ..... 8

*1) Evaluation de la performance du modèle moucheture* ..... 8

- a) Objectifs de la démarche d'évaluation de performance du modèle ..... 8
- b) Les méthodes utilisées pour évaluer la performance du modèle ..... 9

*2) Caractérisation de la base de données moucheture* ..... 10

- a) Composition de la base de données ..... 10
- b) La démarche pour l'obtention des données météorologiques ..... 10
- c) Tendances observées dans la base de données ..... 11
- d) Le cas du module moucheture ..... 11

*3) Choix des tests statistiques* ..... 12

- a) Utilisation de la forêt aléatoire pour la sélection des variables explicatives ..... 12
- b) Création d'un modèle linéaire sur les variables retenues et spécification des éventuelles interactions ..... 14

IV) *Résultats et discussion* ..... 15

*1) Résultats de l'étude de la performance du modèle moucheture* ..... 15

*2) Résultats des analyses statistiques faites de la base de données moucheture* ..... 18

- a) Utilisation de la forêt aléatoire pour la sélection des variables explicatives les plus liées au taux de moucheture ..... 18
- b) Etude focalisée sur les essais présentant des données flore ..... 20
- c) Modèle linéaire généralisé avec les variables explicatives retenues ..... 20

*V) Conclusion & perspectives* ..... 23

*Bibliographie :* ..... 25

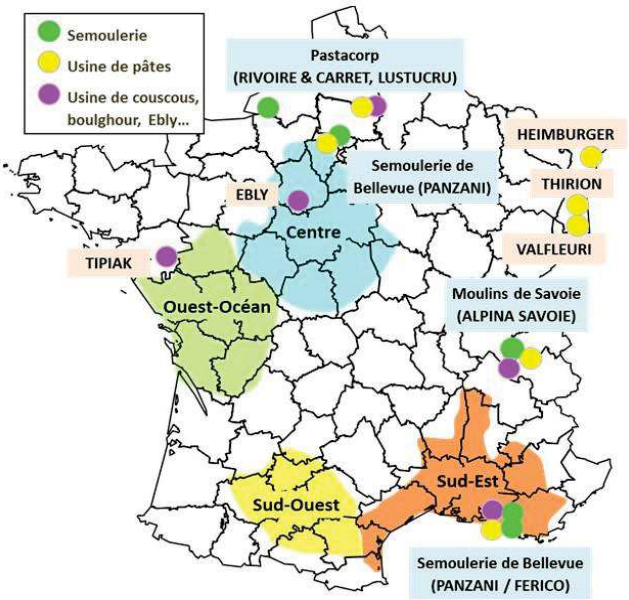



**Figure 1** : Carte de la répartition des bassins de production et des usines de transformation de blé dur en France (Bousquet 2019)

**Figure 2** : Photo de grains de blé dur mouchetés et de la répercussion sur l'aspect visuel des pâtes (Comité technique Blé Dur Ouest Océan 2014)

**Tableau 1** : Résumé des critères de qualité en moucheture pour un lot de blé dur (à partir d'Arvalis-Institut du végétal 2017)

| Niveau | Moucheture % |
|---|---|
| Très bon | <1 |
| Bon | <3 |
| Moyen | 3 à 5 |
| Faible | >5 |
| Très Faible | >10 |

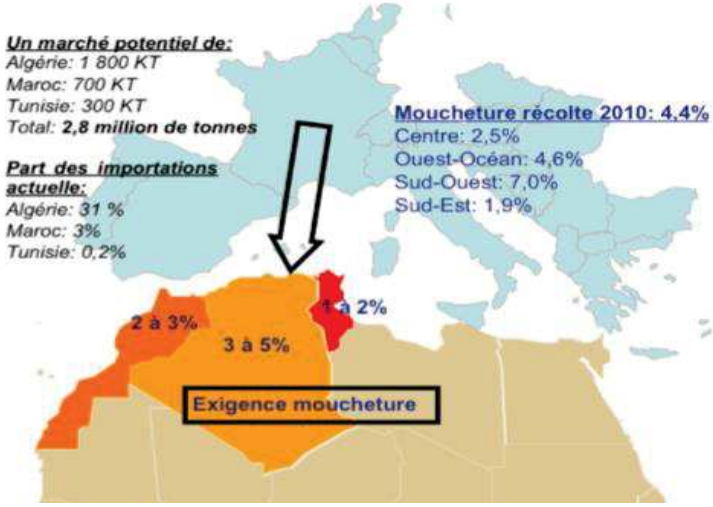



**Figure 3** : Représentation schématique des exigences du Maghreb en termes de moucheture (de La Panouse 2011)

## I) *Introduction*

Le blé dur (*Triticum turgidum durum*) est la 6ème céréale produite dans le monde avec une production mondiale entre 35 et 41 Mt (Arvalis-Institut du végétal 2017). En France, la production de blé dur est concentrée dans 4 bassins de production : Centre, Ouest-Océan, Sud-Est et Sud-Ouest (figure 1) (Arvalis-Institut du végétal 2017). La fabrication de pâtes représente 75% des débouchés mondiaux du blé dur et a un rôle prépondérant dans la définition des exigences et des critères de qualité. Ces exigences se fondent sur 3 catégories : la qualité sanitaire (présence de contaminants : mycotoxines, métaux lourds, résidus pesticides, ergot, carie), le rendement en semoule (présence d'impuretés, remplissage et taille des grains, présence de mitadin) et la qualité des pâtes. Cette dernière est définie par la qualité culinaire (texture et aspect à cuisson) et l'aspect visuel, évalué par la couleur des pâtes (mesurée par l'indice de jaune et de brun) mais également la coloration du grain pouvant être provoquée par la moucheture ou encore le coloré du germe (Arvalis-Institut du végétal 2017). En effet, les grains peuvent présenter des taches sombres sur les enveloppes, et en particulier dans le sillon (grain moucheté) ou autour du germe (coloré du germe), le problème est que cette coloration se retrouve dans les semoules et les pâtes, leur donnant un aspect terne et dans le cas de la moucheture, des ponctuations peuvent apparaître (figure 2). Ce symptôme n'a ni d'impact sur la qualité sanitaire, ni sur le processus de transformation en produit finis, mais sur le commerce du blé dur (Braun et al. 2012). En France le climat expose les cultures de blé dur à un taux de moucheture moyen de 5% (Braun et al. 2012), la qualité du lot sera considérée comme faible lorsque le taux sera supérieur à 5% (Arvalis-Institut du végétal 2017), il s'agit d'un seuil standard (tableau 1).

La moucheture du blé dur apparaît comme un enjeu important, constituant un obstacle face aux exigences des pays importateurs, en effet les normes qualité les plus strictes concernent les pays du Maghreb (figure 3), principaux acheteurs mondiaux de blé dur aux côtés de l'union européenne (Arvalis-Institut du végétal 2017). En effet, le taux limite de moucheture accepté est plus faible et peut aller jusqu'à 1 à 2% en Tunisie (de La Panouse 2011). A cause de cette coloration, le consommateur aura moins tendance à acheter des produits résultants de grains mouchetés, ce qui impacte leur achat et à terme la rentabilité pour l'agriculteur (Braun et al. 2012). La moucheture a toujours fait l'objet de sujet de recherche sans pour autant que les causes soient clairement définies selon les situations rencontrées, car les phénomènes responsables restent à ce jour complexes et variables d'une condition à une autre. Néanmoins il est dit que la moucheture résulte de l'oxydation de composés phénoliques présents dans les cellules de l'épiderme du grain (Arvalis-Institut du végétal 2017).

Depuis plusieurs années Arvalis - Institut du végétal se penche sur la problématique de la moucheture. En effet, il s'agit d'un organisme financé en partie par les agriculteurs et c'est à leur demande que des projets de recherches sont mis en place. De plus, c'est un institut de recherche appliquée et dédiée aux grandes cultures, dont le blé dur, pour laquelle il montre une ancienneté de travaux de recherche.

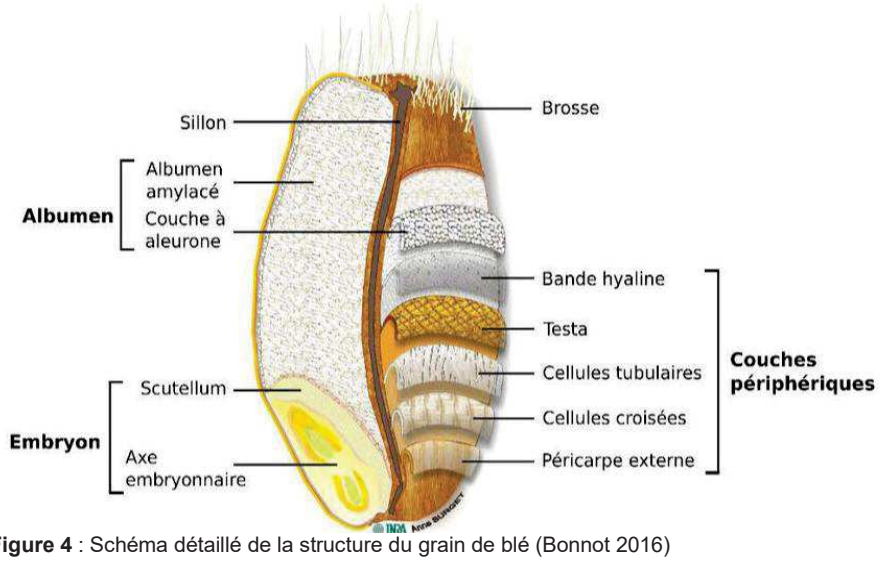



**Figure 4** : Schéma détaillé de la structure du grain de blé (Bonnot 2016)

**Tableau 2** : Tableau récapitulatif des dénominations utilisées pour décrire la moucheture dans différents pays, selon les types de symptômes .La couleur bleu indique que le grain présente les caractéristiques mentionnées (d'après Canadian grain commission 2018 ; United State Department of Agriculture 2013 ; Grain Trade Australia 2016 ; Organisation internationale de normalisation 1994 ; European committee for standardization 2017)

| | | | surface colorée du grain | | sillon du grain | | | autres zones touchées | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sources** | **Localisation** | **Dénominations** | **<50%** | **>50%** | **sillon** | **>1/4 sillon** | **<1/4 sillon** | **coloré du germe** | **coloration des joues du grain** | **albumen touché** | **coloration grise partant de la brosse** |
| Canadian grain commission 2018 | **Canada** | dark smudge | | | | | | | | | |
| | | penetrated smudge | | | | | | | | | |
| | | Black point | | | | | | | | | |
| United State Department of Agriculture 2013 | **Etats-Unis** | Wheat black tip | | | | | | | | | |
| Grain Trade Australia 2016 | **Australie** | Black point/ black tip | | | | | | | | | |
| | | stained grain | | | | | | | | | |
| | | field fungi | | | | | | | | | |
| Organisation internationale de normalisation 1994 | **International** | grains mouchetés | | | | | | | | | |
| European committee for standardization 2017 | **Europe** | grains colorés du germe | | | | | | | | | |
| | | grains mouchetés | | | | | | | | | |

De fait, il est intéressant de savoir quels sont les facteurs de risque de la moucheture du blé dur et ce, dans l'objectif de construire des moyens de gestion efficaces. Ainsi nous pouvons formuler plusieurs questions : quelles sont les conditions environnementales et/ou les pratiques culturales favorables à l'apparition de la moucheture? Quelle est la part de sensibilité variétale? Les champignons sont souvent cités, mais causent-ils vraiment la moucheture, et si oui quelles sont les espèces les plus fréquentes ?

Le but étant de pouvoir faire un diagnostic précis des facteurs à risque impliqués dans la moucheture, grâce à une étude bibliographique et une analyse synthétique d'un ensemble de données collectées par Arvalis sur plusieurs années. Les résultats pourraient servir de piste de gestion ou de recherche afin de limiter l'apparition de la moucheture chez le blé dur. Dans un premier temps il s'agira de faire une synthèse bibliographique afin de faire un état des lieux concernant la définition de la moucheture ainsi que des facteurs impliqués dans son apparition, ensuite une présentation du matériel et des méthodes utilisées sera faite et enfin il s'agira de faire une présentation et une discussion des résultats obtenus suites aux analyses, pour au final conclure sur le sujet.

## II) Synthèse bibliographique

### 1) Une définition de la moucheture qui varie selon les contextes

La définition de la moucheture reste aujourd'hui complexe, sa dénomination et sa définition (tableau 2) varie selon les pays, l'étendue et la zone de coloration (figure 4). Au Canada, si la coloration s'étend sur plus de 50% du grain on parle de "smudge" (propagation jusqu'aux joues du grain, ou plus de la moitié du sillon + coloration du germe). Si il y a propagation jusqu'à l'albumen on parle de "penetrated smudge". Le terme blackpoint est utilisé pour décrire une coloration <50% de la surface du grain sur le germe et les zones environnantes (Canadian Grain Commission 2018). En Australie, 3 termes sont utilisés : "black point" ou "black tip" désigne une coloration >50% du germe + le sillon (si symptômes avancés) (Grain Trade Australia 2016). En revanche, pour une coloration grise à noire partant de la brosse du grain, il s'agit de "stained grain" si cela touche moins ou 50% de la surface du grain, sinon il s'agit de "field fungi". Aux Etats Unis, la dénomination "black tip" est utilisée pour désigner une coloration brune à noire présente sur d'autres endroits que le germe lui-même (United State Departement of Agriculture 2013). Également, des documents officiels issus d'un consensus méthodologique entre tous les acteurs de la filière (de La Panouse 2011) tels que les normes, permettent la caractérisation de la moucheture. A l'échelle internationale la norme ISO décrit les grains mouchetés comme présentant à d'autres endroits que sur le germe une coloration brune à noire (Organisation Internationale de Normalisation 1994). Tandis que la norme européenne distingue d'une part, les grains colorés du germe comme étant des grains ayant la coloration au niveau de l'enveloppe du germe, et d'autre part les grains mouchetés comme étant ceux colorés ailleurs que sur le germe et en particulier au niveau du sillon (European Committee for Standardization 2017).

**Tableau 3** : Taux obtenus pour différentes catégories de coloration du grain selon les différents traitements combinant : 'inoculation ou pas de champignon (CS, ALT), la température et le génotype (Fernandez et al. 2011)

| | | | Kernel discoloration category§ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Humidity/fungal treatment† | Temp.‡ | Genotype | Black point | Dark smudge < 50% | Total black point | Total dark smudge < 50% | Total discoloration < 50% | Total discoloration > 50% |
| CS | Low T | AC Avonlea | 16.7b¶ | . | . | 34.1b | . | 17.5a |
| CS | High T | AC Avonlea | 25.9a | . | . | 25.3c | . | 2.9c |
| ALT | Low T | AC Avonlea | 2.0e | . | . | 10.6de | . | 0.0c |
| ALT | High T | AC Avonlea | 11.3cd | . | . | 9.7d–f | . | 0.0c |
| HUMm | Low T | AC Avonlea | 0.4e | . | . | 3.1e–g | . | 0.0c |
| HUMm | High T | AC Avonlea | 2.9e | . | . | 1.7g | . | 0.0c |
| HUMo | Low T | AC Avonlea | 0.1e | . | . | 1.2g | . | 0.0c |
| HUMo | High T | AC Avonlea | 0.8e | . | . | 0.2g | . | 0.0c |
| DRY | Low T | AC Avonlea | 0.0e | . | . | 0.5g | . | 0.0c |
| DRY | High T | AC Avonlea | 0.1e | . | . | 0.2g | . | 0.0c |
| CS | Low T | AUS26427 | 7.9d | . | . | 44.5a | . | 10.1b |
| CS | High T | AUS26427 | 13.0bc | . | . | 39.2ab | . | 2.6c |
| ALT | Low T | AUS26427 | 0.5e | . | . | 15.2d | . | 0.0c |
| ALT | High T | AUS26427 | 8.3d | . | . | 15.3d | . | 0.0c |
| HUMm | Low T | AUS26427 | 0.0e | . | . | 4.3e–g | . | 0.0c |
| HUMm | High T | AUS26427 | 0.8e | . | . | 2.7fg | . | 0.0c |

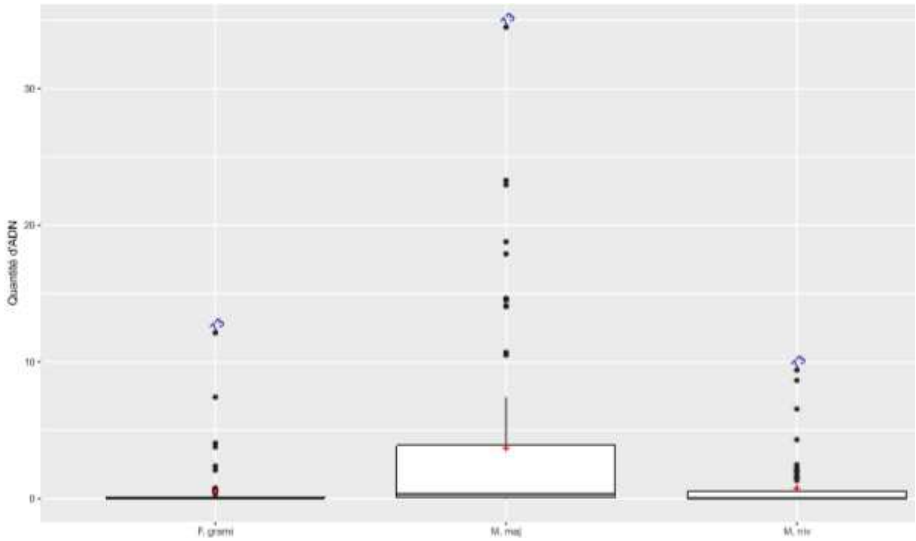



**Figure 5** : Distribution des quantités d'ADN (de gauche à droite) de Fusarium graminearum, Microdochium majus et M.nivale et (en bleu : nombre de données ; en rouge : moyenne de la distribution) (Grignon & Valade 2017)

**Tableau 4** : résultats de l'ANOVA du modèle mixte sur les données qPCR (Grignon & Valade 2017)

| | F | Df | Df.res | Pr(>F) |
|---|---|---|---|---|
| (Intercept) | 30.24 | 1 | 12 | 0.0001 |
| Quantité.F.grami..pg.ng. | 0.00 | 1 | 51 | 0.9835 |
| Quantité.M.nivale..pg.ng. | 6.71 | 1 | 42 | 0.0131 |
| Quantité.M.majus..pg.ng. | 7.68 | 1 | 58 | 0.0075 |
| Quantité.F.grami..pg.ng. :Quantité.M.nivale..pg.ng. | 0.15 | 1 | 57 | 0.7042 |
| Quantité.F.grami..pg.ng. :Quantité.M.majus..pg.ng. | 0.00 | 1 | 49 | 0.9912 |
| Quantité.M.nivale..pg.ng. :Quantité.M.majus..pg.ng. | 8.56 | 1 | 58 | 0.0049 |
| Quantité.F.grami..pg.ng. :Quantité.M.nivale..pg.ng. :Quantité.M.majus..pg.ng. | 0.00 | 1 | 53 | 0.9757 |

Au-delà des symptômes observés à l'œil nu, il a fallu étudier en détail leurs causes d'apparition, c'est ainsi que 2 types de facteurs récurrents dans la bibliographie se distinguent : les facteurs biotiques (champignons, cultivar de blé) et ceux abiotiques (principalement les conditions environnementales).

### 2) Les facteurs biotiques impliqués dans la moucheture

#### a) L'influence des champignons sur la moucheture

L'attaque du grain par certains champignons provoquerait la coloration noire des grains. En France *Microdochium nivale* est souvent considéré comme le champignon causant la moucheture (Desclaux 2000) Cependant, d'autres espèces sont évoquées selon le pays producteur. Ainsi une étude a été faite aux Etats Unis (Fernandez et al. 2011) sur des grains de blé durs en chambre de culture. Ces derniers ont subi différentes conditions de température et d'humidité ainsi qu'une inoculation ou pas d'*Alternaria alternata (ALT)* ou *Cochliobolus sativus (CS)*. S'en suit une comparaison entre les conditions. Il s'est avéré que la coloration du grain est souvent sous forme de coloré du germe ou bien de moucheture du sillon. Pour tous les génotypes en moyenne l'incidence la plus forte pour des colorations de moins de 50 % du grain a été observée pour les inoculations avec le champignon *C.sativus* (57.1 %) suivi d'*A.alternata* (18,2 %) (Fernandez et al. 2011). Des différences sont également observées entre les deux types d'inoculations, c'est seulement pour le traitement *C.sativus* qu'une coloration supérieure à 50% du grain est observée (tableau 3). *C.sativus* causerait des symptômes plus sévères qu' *A.alternata*, ce qui a déjà été supposé dans des publications antérieures (Fernandez et al. 1994). Cette conclusion est à considérer avec prudence car le développement de la moucheture suites à une inoculation de champignon dépend d'autres facteurs (Fernandez et al. 2011).

#### b) Une implication différente des espèces de champignon dans l'apparition de la moucheture

Une autre étude s'est intéressée à pouvoir confirmer ou bien infirmer le lien entre moucheture et la quantité d'ADN de *Microdochium spp.* ou *Fusarium graminearum s*ur la base d'une analyse statistique à partir d'une base de données composée d'échantillon des essais Arvalis récoltés en 2016 (Grignon & Valade 2017). Les résultats montrent que les quantités d'ADN dénombrées sur grains mouchetés pour *M.majus* sont à la fois plus importantes et plus variables que pour *F.graminearum* et *M.nivale* (figure 5). Les analyses microbiologiques montrent la présence d'*A.alternata,* de *Microdochium spp.,* de *Penicilium,* et d'*Aspergillus* sur une grande partie des échantillons mais aucunes traces de *Cochliobolus spp.* n'a été trouvée alors qu'elle est souvent citée dans la littérature. Afin d'analyser statistiquement la relation entre le taux de moucheture et la flore, un modèle linéaire mixte est utilisé avec en effet aléatoire, l'essai ainsi que la variété et en effet fixe les flores pathogènes. Le modèle explique 83% de la variance totale du taux de moucheture et la partie fixe 55% de la variance totale et l'effet de l'essai est plus fort que celui de la variété. Parmi les effets fixes étudiés, la quantité d'ADN de *M.majus*, de *M.nivale* et l'interaction entre les deux ont des effets significatifs (tableau 4).

**Tableau 5** : Coefficient de régression du modèle linéaire mixte sur les données qPCR (Grignon & Valade 2017)

| | Coefficients |
|---|---|
| (Intercept) | 0.14 |
| Quantité.F.grami..pg.ng. | 0.00 |
| Quantité.M.nivale..pg.ng. | 0.11 |
| Quantité.M.majus..pg.ng. | 0.02 |
| Quantité.F.grami..pg.ng. :Quantité.M.nivale..pg.ng. | 0.01 |
| Quantité.F.grami..pg.ng. :Quantité.M.majus..pg.ng. | -0.00 |
| Quantité.M.nivale..pg.ng. :Quantité.M.majus..pg.ng. | -0.01 |
| Quantité.F.grami..pg.ng. :Quantité.M.nivale..pg.ng. :Quantité.M.majus..pg.ng. | 0.00 |

**Tableau 6 :** Taux obtenus pour différentes catégories de coloration du grain selon les différents traitements combinant : l'inoculation ou pas de champignon (CS, ALT), la température et le génotype (Fernandez et al. 2011)

| | | | Kernel discoloration category§ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Humidity/fungal treatment† | Temp.‡ | Genotype | Black point | Dark smudge < 50% | Total black point | Total dark smudge < 50% | Total discoloration < 50% | Total discoloration > 50% |
| CS | Low T | AC Avonlea | 16.7b¶ | . | . | 34.1b | . | 17.5a |
| CS | High T | AC Avonlea | 25.9a | . | . | 25.3c | . | 2.9c |
| ALT | Low T | AC Avonlea | 2.0e | . | . | 10.6de | . | 0.0c |
| ALT | High T | AC Avonlea | 11.3cd | . | . | 9.7d–f | . | 0.0c |
| HUMm | Low T | AC Avonlea | 0.4e | . | . | 3.1e–g | . | 0.0c |
| HUMm | High T | AC Avonlea | 2.9e | . | . | 1.7g | . | 0.0c |
| HUMo | Low T | AC Avonlea | 0.1e | . | . | 1.2g | . | 0.0c |
| HUMo | High T | AC Avonlea | 0.8e | . | . | 0.2g | . | 0.0c |
| DRY | Low T | AC Avonlea | 0.0e | . | . | 0.5g | . | 0.0c |
| DRY | High T | AC Avonlea | 0.1e | . | . | 0.2g | . | 0.0c |
| CS | Low T | AUS26427 | 7.9d | . | . | 44.5a | . | 10.1b |
| CS | High T | AUS26427 | 13.0bc | . | . | 39.2ab | . | 2.6c |
| ALT | Low T | AUS26427 | 0.5e | . | . | 15.2d | . | 0.0c |
| ALT | High T | AUS26427 | 8.3d | . | . | 15.3d | . | 0.0c |
| HUMm | Low T | AUS26427 | 0.0e | . | . | 4.3e–g | . | 0.0c |
| HUMm | High T | AUS26427 | 0.8e | . | . | 2.7fg | . | 0.0c |

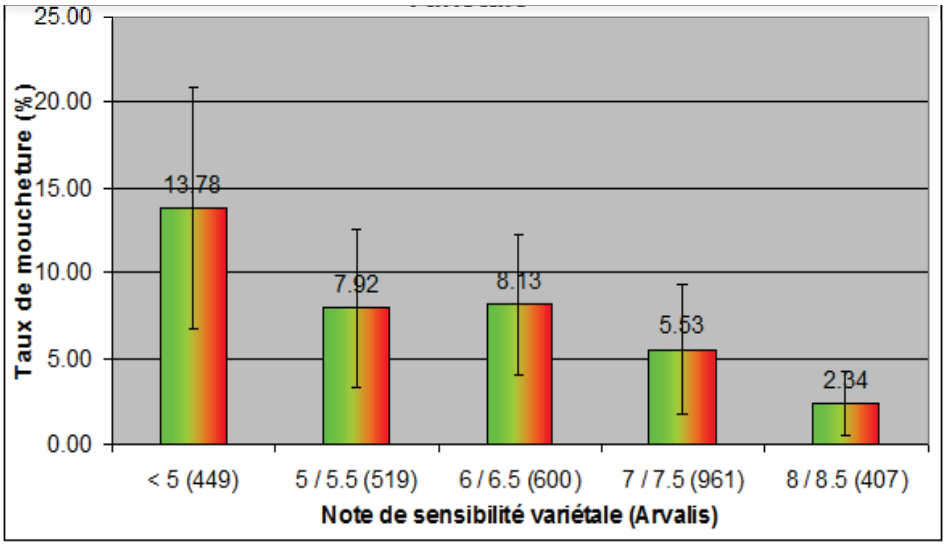



**Figure 6** : Taux de moucheture sur blé dur en fonction de la note de sensibilité variétale (de La Panouse 2011)

Les plus forts effets sur le taux de moucheture sont associés, à *M.nivale* suivi de *M.majus* et enfin de l'interaction entre les 2. Le coefficient de l'interaction entre *M.majus* et *M.nivale* étant négatif **(tableau 5)** en effet, lorsqu'un des champignons est en faible quantité par rapport à l'autre, le taux de moucheture a tendance à augmenter

#### c) Remise en cause de l'influence des champignons sur la moucheture

La présence de champignon apparaît comme un des principaux facteurs de la moucheture, mais son intervention est remise en cause dans certaines études. Dans un article des blés durs étaient exposés en chambre de culture, à 100 % d'humidité à répétition de l'épiaison à la maturité (HUMm), ou bien à une exposition à 100 % d'humidité au stade mi-laiteux (HUMo). Ces blés présentaient des colorations du grain visibles (tableau 6). Dans ces cas, il n'y a pas eu d'inoculation de champignon et des conditions abiotiques contrôlées suffisent pour faire apparaître des colorations du grain, or les incidences restent plus faibles par rapport à des inoculations de *C.sativus* ou bien *A.alternata*. Mais l'auteur met en avant le fait que des expériences conduites en conditions contrôlées ne reflètent pas vraiment la réalité au champ (Fernandez et al. 2011).

Une autre étude a comparé le temps d'apparition des symptômes de la moucheture et la présence de champignon sur les grains de blé tendre (Khani et al. 2018). Les premiers symptômes chez une variété sensible à la moucheture apparaissaient 16 jours après humidification ou 36 jours post floraison sans humidification. Une semaine après les symptômes de moucheture, des mycéliums fongiques sont observés à la surface du grain pour les échantillons humidifiés. Les auteurs supposent que dans ce cas, l'apparition des premiers symptômes de la moucheture du germe précèdent l'infection fongique, et que cela témoignerait de la possibilité du déclenchement des symptômes de moucheture avant l'infection fongique (Khani et al. 2018).

#### d) Une variabilité génétique de la résistance à la moucheture

##### Des sensibilités à la moucheture variables selon les cultivars

La méthode de sélection des cultivars résistants reste la plus efficace d'un point de vue environnemental et économique (Liu et al. 2017). Des différences de résistance du blé dur à la moucheture ont été mises en évidence dans quelques études. Dans ce graphique (figure 6) issu de la base de données regroupant tous les essais avec données moucheture de 1997 à 2010 (de La Panouse 2011), le taux moyen de moucheture par classe de sensibilité à la moucheture est représenté. Les variétés avec des notes de sensibilité basses (plus sensibles) produisent des grains 6 fois plus mouchetés que celles ayant des notes de sensibilité fortes (plus résistantes).

##### Des zones du génome impliquées dans la résistance à la moucheture

Le génome (ici blé tendre) peut être étudié de plus près, afin de repérer les chromosomes ou des zones pouvant potentiellement participer au contrôle de la moucheture. L'étude de Khani et al. en 2018, avait utilisé la méthode de la cartographie QTL (Quantitative Trait Loci). Le marqueur gwm179 a été identifié sur le chromosome 2B et il présente une liaison significative avec la résistance de la variété Kennedy dans 3 environnements testés (Milicent 2008, 2007 et Toowoomba 2009).

Concernant la résistance des variétés Sunco et Pelsart, elle semble se trouver au niveau d'une zone d'introgression Sr36 du chromosome 2B provenant de ***Triticum timopheevi.*** La transmission de la résistance à la moucheture a également été étudiée sur la base de croisement entre variété sensible et résistante. Suite au croisement sensible x résistant la F1 se retrouve avec un taux de moucheture de 9.4%, et pour la F1 de résistant x sensible le taux se retrouve à 1.2%. La sensibilité face à la moucheture a été transmise essentiellement par voie maternelle, en effet l'enveloppe du grain est issue de tissus maternels. Cette étude appuie aussi le fait que pour chaque croisement résistant x sensible, la moyenne du taux de moucheture est supérieure à celui du parent résistant et inférieur à celui du parent sensible (Khani et al. 2018)

La GWAS (Genome Wide Association Study) est une autre méthode qui a été utilisée, celle-ci permet de corréler des variations génétiques aux différences phénotypiques dans l'intégralité du génome. Le comportement face à la moucheture a été mesuré sur 166 cultivars de blé tendre, 25 loci uniques ont été identifiés sur les chromosomes 2A, 2B, 3B, 3D, 4B, 5A, 5B, 6A, 6B, 6D, 7A, 7B et 7D et pouvant expliquer 7.9 à 18 % de la variabilité phénotypique. De fait, 7 de ces loci correspondaient à des zones connues de QTL, ces derniers était impliqués dans la moucheture et avait un rôle dans le métabolisme phénolique, en particulier, leur oxydation et également dans la régulation du stress (Liu et al. 2017).

### *3) Les facteurs abiotiques impliqués dans la moucheture*

En plus des facteurs biotiques, ce sont les facteurs abiotiques qui sont souvent évoqués et considérés comme les facteurs les plus influents sur la moucheture. L'humidité et la température sont souvent citées. Un article s'est intéressé à la comparaison du comportement face à la moucheture, de cultivars de blé tendre et dur cultivés dans différents lieux de d'Egypte (nord-milieu-sud). Les incidences de moucheture les plus élevées étaient observées chez les variétés les plus sensibles avec des taux allant jusqu'à 64%, et chez les variétés les plus tolérantes avec des taux faibles de moucheture diminuant jusqu'à 1.75%. Les blés tendres cultivés au nord de l'Egypte étaient plus touchés que les blés durs présents au milieu et au sud et milieu de l'Egypte. Au nord de l'Egypte se trouve le delta du Nil, les humidités relatives sont plus fortes ce qui favoriserait le développement de la moucheture. Les conditions environnementales apparaissent ici comme étant influentes dans le développement de la moucheture (Draz, El-Gremi, Abd-Elsamad Youssef 2016)

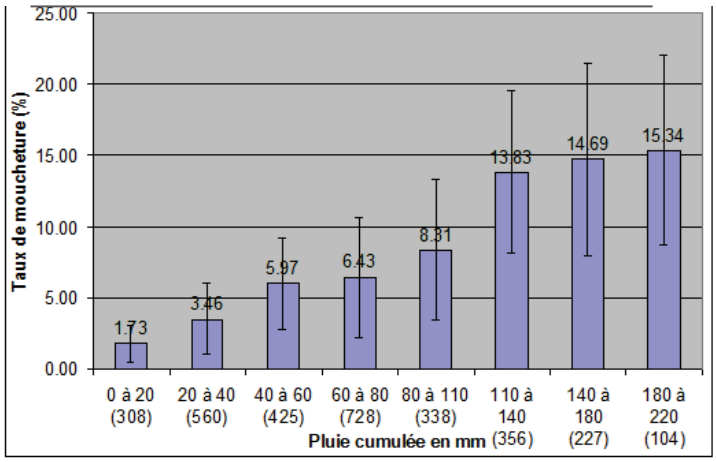



**Figure 7** : Taux de moucheture sur blé dur en fonction du cumul de pluie en mm, du 15/05 au 30/06 (de La Panouse, 2011)

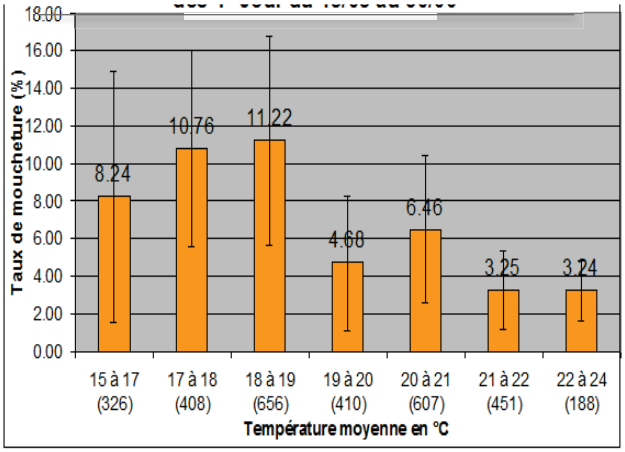



**Figure 8** : Taux de moucheture sur blé dur en fonction de la moyenne des températures en C°, par jour du 15/05 au 30/06 (de la Panouse, 2011)

**Tableau 7** : Taux de moucheture mesuré en 1997 et 1998 dans 2 conditions d'humidité (témoin : absence de tunnel et d'humidité contrôlée/ Tunnel : présence de tunnel et humidité contrôlée) (Desclaux 2000)

| Year | Control | | Tunnel | |
|---|---|---|---|---|
| | Black point | Humidity | Black point | Humidity |
| 1997 | 59 b | 66% | 79 a | 72% |
| 1998 | 39 b | 77% | 63 a | 86% |

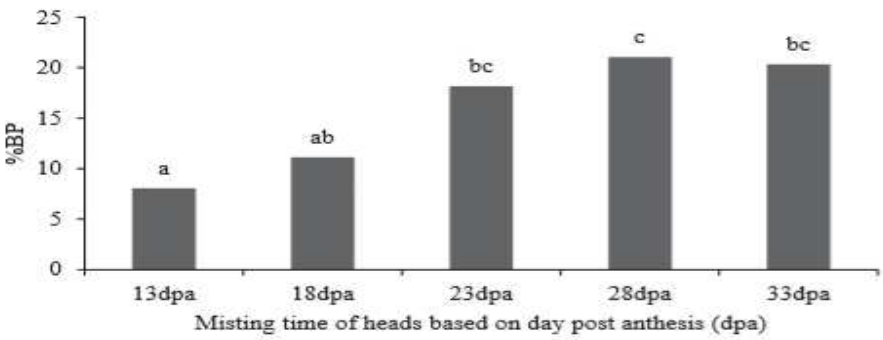



**Figure 9** : Taux de moucheture sur blé tendre ayant subi auparavant une humidification contrôlée à épiaison, à différents moments après anthèse (Khani et al 2018)

### a) Influence de l'humidité et de la température sur la moucheture

Afin de tester la relation établie entre l'humidité et la moucheture, le taux de moucheture moyen a été mesuré par grande région de production de 2003 à 2010 en fonction des cumuls de pluie relevés aux stations choisies du stade floraison à la récolte (figure 7), il apparaît que plus le cumul de pluie augmente et plus le taux de moucheture augmente avec un taux de corrélation de 0.7 (de La Panouse 2011). Concernant la température, sur l'histogramme représentant le taux de moucheture en fonction de la température moyenne (mesurée sur la même période que le cumul de pluie) on observe des taux de moucheture plus élevés à partir d'un seuil de température qui est de 19°C (figure 8) (de La Panouse 2011). Donc suites à ces observations il est déduit que l'apparition de la moucheture nécessite de fortes humidité et des températures inférieures ou égales à 19°C.

Ces conclusions concordent avec l'étude de Desclaux en 2000, où 14 variétés de blé dur ont été comparées dans différentes combinaisons d'humidité et de température de l'épiaison à la floraison. Après analyse de variance, il est apparu que les 3 principaux effets impliqués dans la moucheture par ordre d'importance étaient : l'année, le traitement, et le cultivar (Desclaux 2000). De plus, une augmentation du taux d'humidité était liée à une augmentation significative de la moucheture pour une année donnée (tableau 7). Enfin le plus fort taux de moucheture a été obtenu avec de forts taux d'humidité (80-90%) et de faibles températures (13-14°C). Bien que de fortes humidités influencent l'apparition de la moucheture, c'est l'interaction humidité * température, qui a un poids plus important.

### b) Etude de la fenêtre de sensibilité à la moucheture

La combinaison température/humidité est nécessaire à l'apparition de la moucheture, mais il existe également une période pendant laquelle la moucheture est favorisée, rendant la plante plus vulnérable aux déclenchements des symptômes. Les pluies qui interviennent avant floraison semblent avoir un impact sur le taux de moucheture et la température, aurait un effet de l'épiaison à la floraison (Desclaux 2000). Il apparaît qu'il existe une fenêtre de sensibilité à la moucheture durant le stade de développement du grain (Khani et al. 2018). Concernant les essais conduits sur une variété sensible de blé tendre sous humidification contrôlée l'incidence maximale s'élève à 17.7% et a été enregistrée 23 jours après anthèse et en 2015 le taux le plus élevé avec 21.1% s'est mesuré 28 jours après anthèse. En revanche le taux le plus bas de 8.1% a été mesuré 13 jours après anthèse et est significativement différent de celui mesuré 23 jours après anthèse (figure 9). Donc, il existerait une fenêtre de sensibilité à la moucheture pour la variété Hume soit environ 3-5 semaines après floraison (Khani et al. 2018).

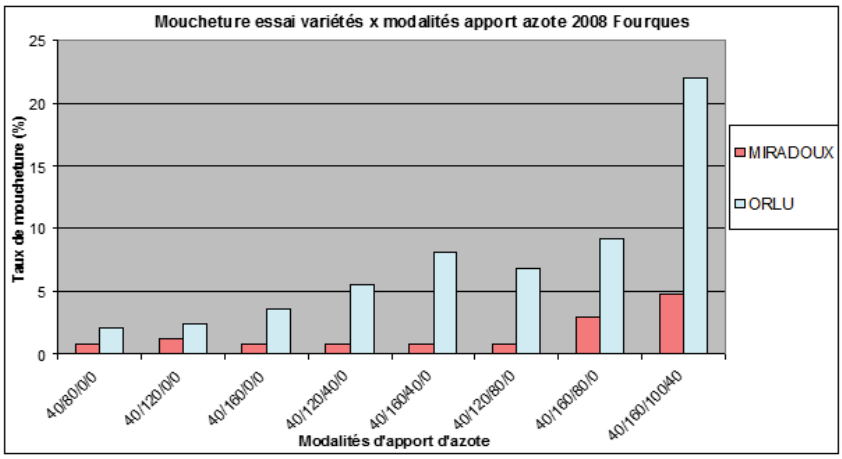



**Figure 10** : Taux de moucheture sur blé dur en fonction de la variété (Miradoux (peu sensible), Orlu (sensible) et de l'apport d'azote (croissant de gauche à droite, de 120 à 340 unités) (de La Panouse 2011)

**Tableau 8** : Tableau récapitulatif des articles étudiés et des causes principales de la moucheture qui en ressortent

| | facteurs biotiques | | | facteurs abiotiques | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | champignons | résistance variétale | QTL , hérédité | humidité | humidité + température | fenêtre de sensibilité | techniques culturales |
| Desclaux 2000 | ■ | ■ | | | ■ | ■ | |
| Fernandez et al. 2011 | ■ | | | ■ | | ■ | |
| Grignon et Valade 2017 | ■ | | | | | | |
| Khani et al. 2018 | | | ■ | ■ | | ■ | |
| Liu et al. 2017 | | ■ | ■ | | | | |
| de La Panouse 2011 | | ■ | | | ■ | ■ | ■ |
| Draz, El-Gremi, Abd-Elsamad Youssef 2016 | | | | ■ | | | |

### c) Implication des pratiques culturales

Au-delà des conditions environnementales favorisant la moucheture il apparaît que les pratiques culturales jouent également un rôle dans l'apparition de la moucheture. Dans l'étude menée par Geoffroy de la Panouse en 2011, plusieurs pratiques sont citées comme pouvant favoriser la moucheture. Concernant le lien entre irrigation et taux de moucheture, une synthèse issue d'un réseau de parcelle datant de 2006 à 2009 a été étudiée et dans 13 cas sur 17 la culture en irriguée présente un taux de moucheture supérieure d'au moins un point, comparée à la situation contraire. Il est déduit que la pratique irrigation semble augmenter le taux de moucheture mais dans des proportions tolérables. Pour les apports d'azote, un essai croisé (avec les variétés Miradoux : peu sensible et Orlu : sensible) visant à étudier l'influence de la stratégie d'apport azoté sur différents paramètres de qualité du blé dont la moucheture, a été analysé et donc il apparaît que plus l'apport d'azote est tardif et élevé et plus le taux de moucheture augmente (figure 10). Mais les doses d'azote apportées sont guidées par des objectifs de rendement, de taux de protéine du grain qui sont deux critères auxquels plus d'importance est accordée, par rapport à la moucheture et de fait les modulations de la dose d'azote ne serait pas un moyen gestion pertinent de la moucheture (de La Panouse 2011)

Il en ressort de cette bibliographie que les facteurs sont de 2 types, abiotique et biotique (tableau 8). Côté biotique l'influence des champignons sur le développement de la moucheture (mais pas forcément les mêmes espèces) et la résistance variétale est souvent mentionné. Concernant les facteurs abiotiques, la majorité mentionne l'existence d'une fenêtre de sensibilité au risque moucheture, ainsi que l'effet de l'humidité et de son interaction avec la température. En revanche peu parlent de l'influence des pratiques culturales. Les facteurs qui sont cités sont souvent les mêmes, mais il peut y avoir des désaccords entre les articles, montrant que la moucheture est un phénomène complexe et qu'il ne peut y avoir de conclusion tranchée selon la situation à laquelle on se réfère. De ce fait, cette synthèse bibliographique avait pour but de faire une brève présentation des connaissances actuelles concernant la moucheture à l'échelle internationale. La suite de ce rapport sera entièrement consacrée à la situation en France.

**Figure 11** : Schéma des principales étapes de l'exploitation de la base de données moucheture

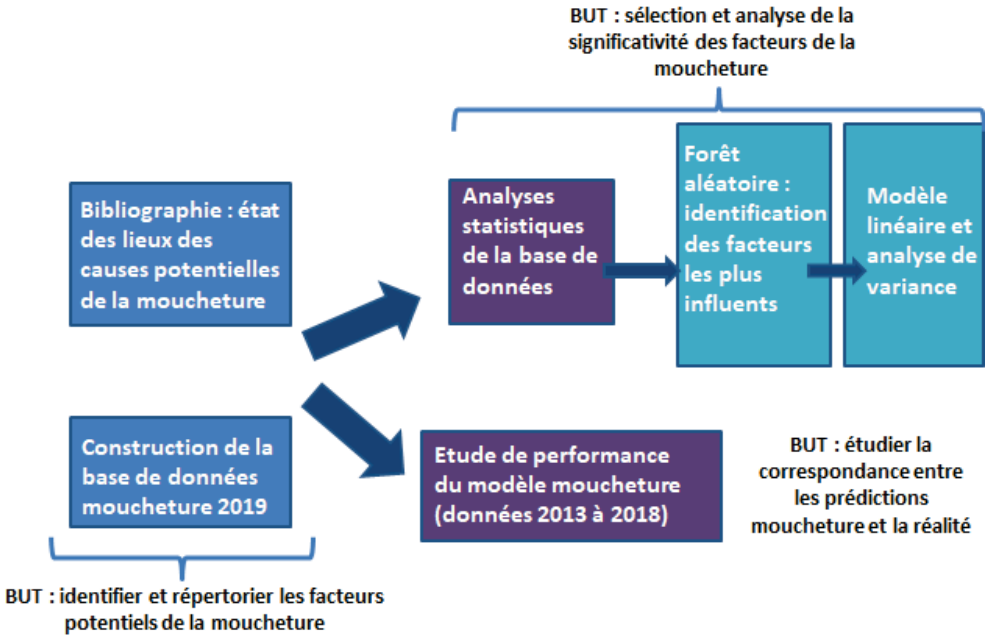



**Tableau 9** : Tableau regroupant les variables climatiques utilisées dans le modèle moucheture (Laberdesque 2013)

| | *Variable* | *critère* | *Variable* | *critère* | *Données* |
|---|---|---|---|---|---|
| **V1** | Pluie | / | / | / | Cumul |
| **V2** | Ampl | / | / | / | Cumul |
| **V4** | Ray | / | / | / | Cumul |
| **V12** | Tmoy | >15 | / | / | occurrence |
| **V27** | Pluie | >5 | Tmoy | <12 | occurrence |
| **V38** | Pluie[-1] | >5 | Tmoy | <17 | occurrence |
| **V51** | Tmaxi | <26 | Tmini | >12 | occurrence |
| **V53** | Pluie[-1] | >5 | Pluie | >5 | occurrence |

## III) Matériel et méthodes

Afin de pouvoir identifier les différents types de facteurs influençant le taux de moucheture et leurs implications deux types de méthodes seront effectués (figure 11). Dans un premier temps il s'agit de pouvoir tester la performance d'un modèle moucheture crée auparavant sur les nouvelles données moucheture acquises récemment. Dans un deuxième temps un travail d'analyse sera fait sur une base de données regroupant toutes les informations des essais Arvalis pour lesquels il y a eu mesure du taux de moucheture sur le blé dur.

### 1) Evaluation de la performance du modèle moucheture

#### a) Objectifs de la démarche d'évaluation de performance du modèle

Un modèle moucheture a auparavant été mise au point, il résulte d'une base de données complète Arvalis regroupant tous les essais de 1997 à 2012. Le modèle prédit le taux de moucheture sur la base de la sensibilité variétale, du précédent, et de variables climatiques (pluie, amplitude thermique, rayonnement, température). Ajoutés à cela, des corrections sont effectuées selon le bassin de production du blé dur. Au final il en ressort que l'équation du modèle est sous la forme :

**Moucheture prédit** = exp (1.85 + **A** + **B** + 0.00217***V1** + (-0.00122)***V2** + (-4.51$^{E}$-05)***V4** + (-0.0319)***V12** + 0.0406***V51** + 0.314***V27** + 0.0551***V38** + 0.117***V53) – 1**

(Laberdesque 2013) avec A, B qui sont les paramètres dépendants de la sensibilité variétale et du précédent cultural et les V qui sont les variables climatiques, qui ont été intégrées au modèle moucheture (tableau 9). Le but a été de pouvoir appliquer le modèle sur des années pour lesquelles il n'a pas été testé, c'est-à-dire de 2013 à 2018, et ce uniquement sur les essais variété. Le but étant de pouvoir comparer les taux prédit et observés afin de voir si les prédictions restaient cohérentes avec ce qui est obtenus en réalité au champ.

**Tableau 10** : Exemple d'un tableau d'entrée du modèle moucheture

| station | nom | note_mouch | date semis | precedent |
|---|---|---|---|---|
| 3659 | ANVERGUR | 7 | 25/10/2012 | Colza |
| 3659 | DAURUR | 6 | 25/10/2012 | Colza |
| 3659 | FLORIDOU | 7 | 25/10/2012 | Colza |
| 3659 | LUMINUR | 8 | 25/10/2012 | Colza |
| 3659 | PICTUR | 7.5 | 25/10/2012 | Colza |
| 3659 | PLUSSUR | 9 | 25/10/2012 | Colza |
| 3659 | QUALIDOU | 7 | 25/10/2012 | Colza |
| 3659 | TABLUR | 7.5 | 25/10/2012 | Colza |
| 1801 | TABLUR | 7.5 | 25/10/2012 | Colza |
| 1801 | DAURUR | 6 | 25/10/2012 | Colza |

**Tableau 11** : Tableau de sortie du modèle moucheture, la colonne « result » correspond au taux de moucheture prédit

| année | station | nom | note_mouc | date.semis | precedent | CLASS_MOU | CLASS_PREC | Date_epiai | result |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2013 | 3659 | ANVERGUR | 7 | 25/10/2012 | Colza | 0 | 0.474 | 21/05/2013 | 6.1269534 |
| 2013 | 3659 | DAURUR | 6 | 25/10/2012 | Colza | 0 | 0.474 | 21/05/2013 | 6.1269534 |
| 2013 | 3659 | FLORIDOU | 7 | 25/10/2012 | Colza | 0 | 0.474 | 21/05/2013 | 6.1269534 |
| 2013 | 3659 | LUMINUR | 8 | 25/10/2012 | Colza | -0.444 | 0.474 | 21/05/2013 | 2.7751737 |
| 2013 | 3659 | PICTUR | 7.5 | 25/10/2012 | Colza | 0 | 0.474 | 21/05/2013 | 6.1269534 |
| 2013 | 3659 | PLUSSUR | 9 | 25/10/2012 | Colza | -0.444 | 0.474 | 21/05/2013 | 2.7751737 |
| 2013 | 3659 | QUALIDOU | 7 | 25/10/2012 | Colza | 0 | 0.474 | 21/05/2013 | 6.1269534 |
| 2013 | 3659 | TABLUR | 7.5 | 25/10/2012 | Colza | 0 | 0.474 | 21/05/2013 | 6.1269534 |
| 2013 | 1801 | TABLUR | 7.5 | 25/10/2012 | Colza | 0 | 0.474 | 22/05/2013 | 5.5021821 |
| 2013 | 1801 | DAURUR | 6 | 25/10/2012 | Colza | 0 | 0.474 | 22/05/2013 | 5.5021821 |

**Tableau 12** : Tableau récapitulatif des classes de sensibilité à la moucheture et du précédent associé au modèle moucheture ainsi que les valeurs des classes qui leurs ont été attribuées (Laberdesque 2013)

| | CLASSE MOUCHETURE | | | CLASSE PRECEDENT | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | > ou = 8 | > ou = [6-8] | <6 | maïs ou sorgho | colza ou tournesol | autres |
| | peu sensible | moy sensible | très sensible | effet plus important | effet moy important | effet faible |
| valeur classe | -0.444 | 0 | 0.412 | 0.909 | 0.474 | 0 |

**Tableau 13** : Tableau de contingence entre les classes prédites par le modèle moucheture (tauxmouch.ppred4) et celles observées en réalité (tauxmouch.obs4) (à partir de la base de données moucheture)

| | tauxmouch.pred4 | | | |
|---|---|---|---|---|
| tauxmouch.obs4 | [0,2] | (2,10] | (10,40] | (40,50] |
| [0,2] | 91 | 197 | 20 | 0 |
| (2,10] | 16 | 243 | 34 | 0 |
| (10,40] | 1 | 73 | 44 | 0 |
| (40,50] | 0 | 1 | 1 | 0 |

### b) Les méthodes utilisées pour évaluer la performance du modèle

Afin d'évaluer la performance du modèle moucheture, des représentations graphiques ont été faites, pour observer dans un premier temps les tendances de la confrontation entre les taux prédits et observés de moucheture. Pour cela il faut d'abord fournir un tableau d'entrée au modèle avec des informations concernant le numéro de la station, le nom de la variété, la note de sensibilité à la moucheture (note du GEVES actualisée par ARVALIS), la date de semis ainsi que le type de précédent (tableau 10). Concernant la note de sensibilité, plus celle-ci est élevée et plus la variété est considérée comme résistante à la moucheture. Par la suite, le modèle fourni un tableau de sortie avec la classe moucheture de la variété ainsi que celle du précédent, la date d'épiaison et le taux de moucheture prédit (ici result) (tableau 11). Concernant la classe moucheture, elle est définie selon les notes de sensibilité à la moucheture, pour les notes inférieures à 6, la variété est classée comme très sensible, entre 6 et 8 moyennement sensible et supérieur à 8 peu sensible. Il en est de même pour les précédents, pour lesquels 3 classes ont été établies suivant le risque auquel ils sont associés à la moucheture : l'effet est le plus important pour le maïs et le sorgho, intermédiaire pour le colza et le tournesol et enfin faible pour les autres précédents (tableau 12). (Laberdesque 2013).

Une fois les résultats du modèle obtenus, les valeurs du taux de moucheture prédit ainsi que celles observées sont récupérées afin d'en faire des représentations graphiques. Pour observer plus facilement les petites valeurs, les taux de moucheture sont transformés en log (taux de moucheture). Un graphique a été fait pour chacune des échelles (nationale, centre, sud-ouest et sud-est). Le but étant d'avoir une première vision de la qualité de prédiction du modèle. Car ensuite, cette qualité de prédiction a été quantifiée. Dans un premier temps, des taux de mauvais classement ont été calculés pour deux types de découpage des taux de moucheture en classes, soit suivant les classes : [0-2], [2-5]; [5-10] et >10 ou bien [0-2];[2-10]; [10-40] et >40. Ce découpage a été fait car le modèle ne va pas pouvoir prévoir de façon précise le taux de moucheture observé et il aurait tendance à mieux prédire des classes de moucheture.
Pour cela, un tableau de contingence des taux de moucheture prédit face à ceux observés a été fait pour repérer les valeurs qui ont été mal classées par le modèle, suivant chacune des classes établies (tableau 13).Sur la diagonale en bleu se trouvent les taux de moucheture qui ont été classés dans la même catégorie à la fois par le modèle moucheture et ce qui a été observé en réalité, ce sont les valeurs bien classées par le modèle, toutes les valeurs autres que sur la diagonale, ont donc été mal classées. Il s'agira alors de calculer le taux de mauvais classement en général, et pour chaque classe afin de repérer si le modèle prédit une classe mieux que l'autre. Les 2 types de découpage de classe seront comparés et donc, il sera possible de voir si selon le seuil, la qualité de prédiction est meilleure. Ce travail est fait pour tous les bassins de production puis, pour chaque bassin afin de voir si selon la localisation, la prédiction est meilleure.

**Tableau 14** : Détails des indicateurs utilisés pour évaluer la qualité de prédiction d'un modèle (Wallach et al. 2019)

| indicateurs | signification | signification statistique | tendances |
|---|---|---|---|
| **biais** | biais du modèle | moyenne des écarts (observé-prédit) | si positif : sous estimation du modèle; si négatif : surestimation du modèle |
| **minres** | minimum des résidus | minimum des écarts (observé-prédit) | |
| **maxres** | maximum des résidus | maximum des écarts (observé-prédit) | |
| **rmse** | root mean square error | racine (moyenne (observé-prédit)$^2$) | Plus proche de 0, plus prédiction bonne |
| **rrmse** | relative root mean square error | rmse/ moyenne (y obs) | si le ratio >1, erreur supérieure à la moyenne |
| **ef** | efficience | 1-(somme (prédit-observé)$^2$/somme(prédit-moyenne y obs)$^2$) | Plus proche de 1, plus prédiction bonne |
| **ymin** | y minimum | le minimum des y observés | |

**Tableau 15** : Tableau récapitulatif des variables météo qui ont été intégrées à la base de données et calculées avec CLIMBOX

| notation des variables | signification | période |
|---|---|---|
| **sPluie** | total somme des pluies | **épiaison+550°jours** |
| **sPluie >0.5** | somme des pluies >0.5mm | |
| **sPluie >5** | somme des pluies >5 mm | |
| **nPluie** | nombre de jours où il a plu | |
| **nPluie >0.5** | nombre de jours où il a plu > 0.5 mm | |
| **nPluie >5** | nombre de jours où il a plu > 5 mm | |
| **sTmoy** | somme des températures moyenne | |
| **nTmoy < 15** | nombre de jour où la temp moyenne<15°C | |
| **sTmoy >15** | nombre de jour où la temp moyenne>15°C | |
| **Rg** | Rayonnement global | |
| **Indice de pluie** | Pluie>0.5* (occurrence>0.5/durée précipitation) | |

Dans un deuxième temps, des indicateurs de performance (Wallach et al. 2019) (tableau 14) ont été calculés. Pour cela, une focalisation s'est faite sur la rmse (root mean square error) ainsi que l'efficience. Les prédictions du modèle n'étant pas bonnes cela signifierait que les facteurs pris en compte dans le modèle ne suffisent pas pour décrire la réalité concernant la moucheture, et que le phénomène est bien plus complexe qu'il ne paraît. Ce pourquoi un 2ème travail d'analyse a été fait sur une base de données moucheture plus complète intégrant de nouvelles années, ainsi que d'autres facteurs qui n'ayant pas été pris en compte dans le modèle, tels que le traitement fongique, la composition et la quantification de la flore fongique (quantité d'ADN). La partie qui suit, se focalisera plus sur la présentation et la caractérisation de la base de données moucheture, afin d'y observer les éventuelles tendances qui se dégagent.

## 2) Caractérisation de la base de données moucheture

### a) Composition de la base de données

La base de données regroupe tous les essais Arvalis comportant tous la mesure moucheture. Elle est composée de 901 essais datés de 1984 à 2018, et comporte 8126 lignes de données. Les informations proviennent essentiellement de la base de données SILENA regroupant toutes les informations expérimentales de chacun des essais suivis par Arvalis de 1997 à aujourd'hui, de données provenant des essais CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection), et également de travaux d'équipes ayant travaillé auparavant sur la moucheture. La base de données moucheture est divisée en 3 grandes parties : la 1ère partie concerne l'identification de l'essai (numéro d'identification, année, localisation, type d'essai…), ensuite la 2ème regroupe les variables concernant la culture (variété, date de semis, épiaison, rendement…) l'itinéraire technique (les modalités de l'essai : essai variété, fongicide, azote…) et les variables météorologiques (somme de pluies, somme de températures, nombre de jours de pluies). Enfin la 3ème partie est celle qui contient toutes les données concernant la qualité de la récolte (mesure mitadin : grain de blé dur non complétement vitreux et comportant des parties blanches (Arvalis-Institut du végétal 2017), moucheture, coloré du germe, analyses flore)

### b) La démarche pour l'obtention des données météorologiques

Les données météorologiques (tableau 15) ont été calculées avec l'outil Arvalis CLIMBOX pour chacun des essais et chacune des variétés. Pour cela il est nécessaire de pouvoir renseigner la localisation de l'essai, c'est en priorité la latitude et la longitude de l'essai qui a été utilisée, si cette information n'était pas disponible c'est le numéro de la station météo qui est pris en compte et enfin si les deux informations précédentes n'étaient pas renseignées c'est le barycentre de la commune qui sera utilisé (de fait, cette valeur peut constituer un biais dans le cas où le site de l'essai se trouve très loin du centre de la commune). Le calcul des variables météo n'a pas été possible pour tous les essais dans la mesure où pour certains, aucune donnée sur la localisation ou la date de semis n'a pu être trouvée, ou encore la variété n'a pas pu être reconnue. En effet, CLIMBOX va calculer les variables météo en se basant sur la date de semis.

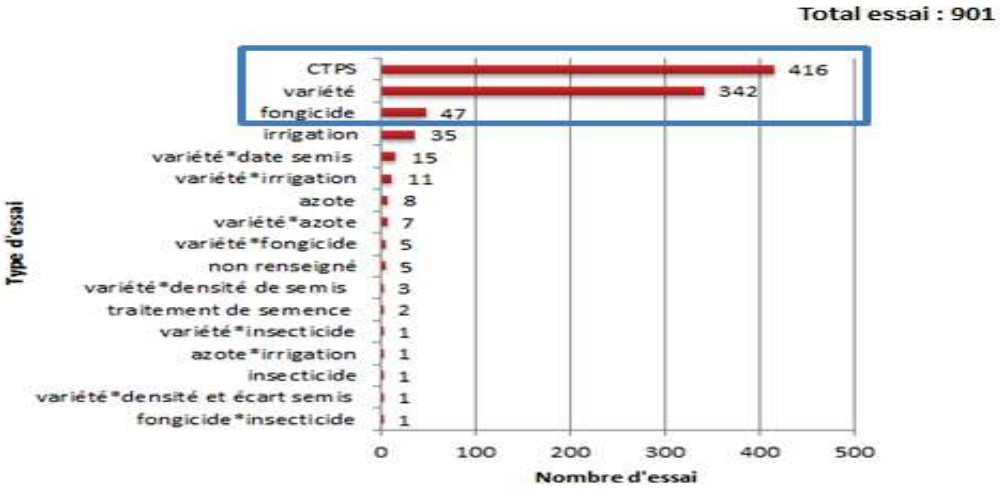



**Figure 12** : Répartition du nombre d'essai suivant les types d'essai (à partir de la base de données moucheture 2019)

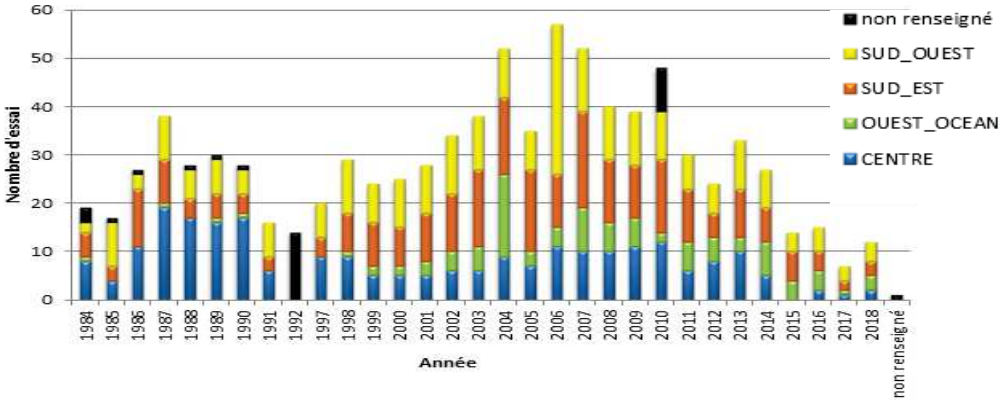



**Figure 13** : Nombre d'essai avec la mesure moucheture en fonction des années et selon les bassins de production de blé dur (à partir de la base de données moucheture 2019)

**Tableau 16** : Répartition du nombre d'essai suivant le type de mesure qualité effectué et selon les différents bassins de production (à partir de la base de données moucheture 2019)

| Valeurs | CENTRE | OUEST_OCEAN | SUD_EST | SUD_OUEST | non renseigné | Total général |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Analyse_mitadin | 131 | 89 | 198 | 191 | | 609 |
| Analyse graminearum + microdochium | 7 | 1 | 3 | 5 | | 16 |
| Analyse microdochium seule | 1 | | | | | 1 |
| Analyse fongique large | 3 | | 1 | 3 | | 7 |
| Analyse colore du germe | 12 | 3 | 10 | 14 | | 39 |
| Analyse moucheture | 247 | 101 | 263 | 258 | 32 | 901 |
| Analyse moucheture <1/4sillon | 11 | 5 | 14 | 23 | | 53 |

Toutes les variables météorologiques sont calculées sur la période «épiaison à épiaison + 550° jours base 0°C» car selon la bibliographie c'est la période qui apparaît comme étant la plus influençable dans le développement de la moucheture. Les variables choisies concernent le cumul des pluies > 0.5 mm (seuil à partir duquel les pluies sont considérées comme significatives), le nombre de jours où il a plu, la somme des températures moyennes avec la somme des températures moyennes <15°C (pour repérer les jours dits favorables à la moucheture selon la bibliographie), le rayonnement global ainsi que l'indice de pluie. Ces variables météo ont été choisies sur la base des informations issues de la bibliographie.

### c) Tendances observées dans la base de données

Différents types d'essais sont regroupés dans la base de données (figure 12), les essais CTPS sont en majorité à 416 essais avec les essais variétés, au nombre de 342, ils représentent à peu près 84 % des essais. Les essais fongicides et irrigation se retrouvent juste derrière au nombre de 47 et 35 respectivement, soit à peu près 9% des essais au total. L'évolution de la répartition des essais avec les mesures moucheture a été étudiée (figure 13), des fluctuations plus ou moins importantes sont observées mais il y a une baisse à partir de 2006. Il y a une tendance à avoir de moins en moins d'informations disponibles concernant les données sur la moucheture. Sur cette même figure la proportion de chaque bassin de production est représentée jusqu'en 1998 les essais du centre étaient en majorité tandis qu'à partir de 1998 ce sont ceux du sud-ouest et sud-est qui le deviennent. Il y a donc hétérogénéité de la répartition de données disponibles sur la moucheture selon le bassin de production. Ensuite la répartition des essais selon le type de mesure moucheture et flore et les bassins de production (tableau 16) a été observée. Le type de mesure qui a été le plus souvent effectué est celle du taux de moucheture et du mitadin. Les autres mesures, plus précises sont présentes de façon récente d'où leur faible représentation.

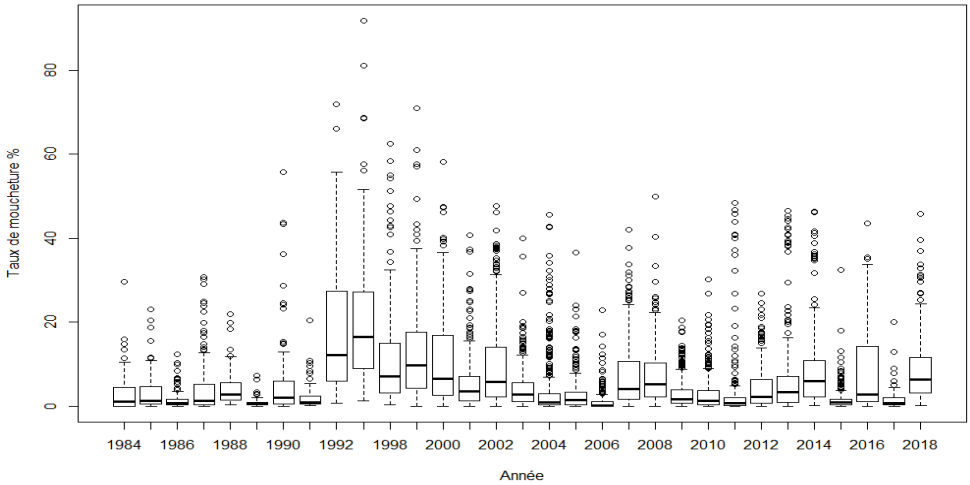



**Figure 14** : Boxplot de la moyenne des taux de moucheture obtenus selon les années (à partir de la base de données moucheture)

**Tableau 16** : Tableau récapitulatif du module moucheture (à partir de la base données moucheture 2019)

| ANNEE | REGION | NOM | NUMERO_ESSAI | BIENSUR | NOBILIS | ANVERGUR | RGTVOILUR | KARUR | Total_échantillon |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2016 | OUEST_OCEAN | MAGNERAUD | 131678 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | SUD_EST | FOURQUES | 131685 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | SUD_OUEST | EN_CRAMBADE | 131692 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 2017 | SUD_EST | FOURQUES | 133789 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | SUD_OUEST | EN_CRAMBADE | 133796 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 2018 | CENTRE | VAR_BD | 143088 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | OUEST_OCEAN | LEOVILLE | 138447 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | SUD_EST | EURRE | 138456 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | | FOURQUES | 138455 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | SUD_OUEST | EN_CRAMBADE | 138462 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | | | | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | **50** |

**Tableau 17 :** Tableau des notes de sensibilité à la moucheture pour toutes les variétés du module moucheture

| variété blé dur | note moucheture |
|---|---|
| Biensur | 5.5 |
| Nobilis | 6 |
| Anvergur | 7 |
| RGT Voilur | 8 |
| Karur | 9 |

Enfin le taux de moucheture en fonction des années et en considérant tous les types d'essais confondus a été représenté sous forme de boxplot (figure 14) Ce taux apparaît comme étant variable d'une année à une autre et au sein même d'une année. Néanmoins quelques tendances sont observées avec une augmentation du taux de moucheture de la période 1984-1991, où les taux se situaient globalement entre 0 et 10%, à la période 1992-2002, où les taux augmentent jusqu'à 55 % à peu près, après 2002 il y a des variations mais globalement les taux sont plus faibles qu'en 1992-2002.

#### d) Le cas du module moucheture

Parallèlement à cette base de données, a été construite la base du module moucheture (tableau 16). Ce module a débuté en 2016, et rassemble les mêmes variétés de blé dur des essais variétés (40 IVB), pour lesquelles des analyses moucheture ont été faites. Ces variétés choisies sont les suivantes : Biensur, Nobilis, Anvergur, RGT Voilur, et Karur, ces dernières ont été choisies car elles fournissent une palette variée de résistance à la moucheture (tableau 17). La base de données générale n'est pas toujours complète et prend en compte de nombreux facteurs à la fois. Ces derniers présentent beaucoup de modalités ce qui ne facilite pas toujours les analyses statistiques. De fait l'idée de la base module moucheture c'est de pouvoir avoir une base de données restreinte et carrée qui va servir de base à des analyses statistiques plus fines. Car en effet pour toutes les variétés, le taux de moucheture ainsi que les analyses de la flore fongique seront disponibles.

### *3) Choix des tests statistiques*

Une fois que la base de données caractérisée, une réflexion est faite sur le choix des analyses statistiques à effectuer, le but étant de pouvoir identifier les facteurs ayant un effet significatif sur la moucheture, et au final de voir si sur la base des facteurs sélectionnés, il est possible de pouvoir mieux expliquer à quoi sont dues les variation du taux de moucheture.

#### a) Utilisation de la forêt aléatoire pour la sélection des variables explicatives

##### *Principe de la forêt aléatoire et explication du choix de la méthode*

Cette méthode a été choisie car elle peut s'appliquer sur des données de type « enquête » c'est-à-dire qui ne résultent ni d'un seul essai, ni d'un réseau d'essai, de fait la base de données moucheture utilisée est construite à partir de données de différentes sources avec des données aux différentes modalités. De plus, la forêt aléatoire s'applique lorsque la variable à expliquer (ici le taux de moucheture) est qualitative ou quantitative et les variables explicatives sont qualitatives et/ou quantitatives. De plus cette méthode ne nécessite pas la vérification d'hypothèse sur les données

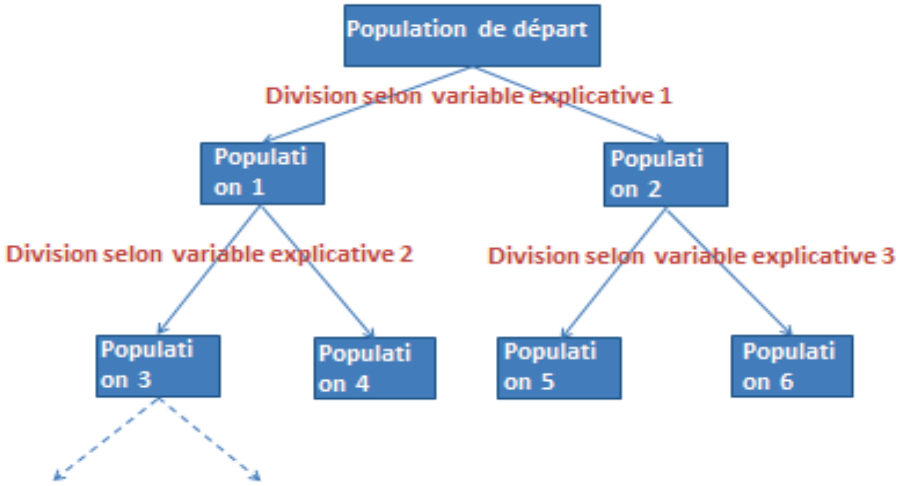



**Figure 15** : Schématisation du principe de la méthode de la forêt aléatoire basée sur les arbres de décisions

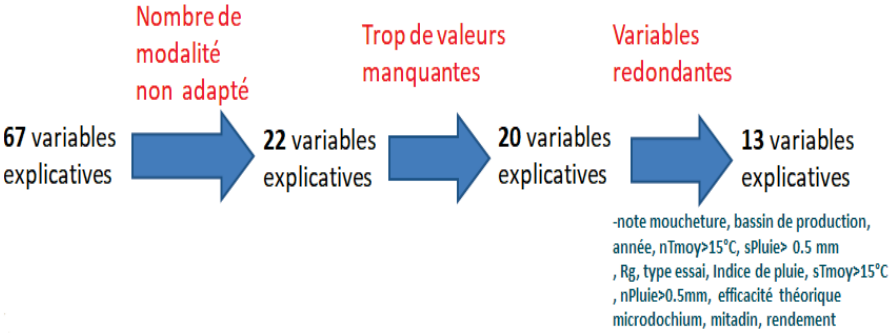



**Figure 16** : Etapes de la sélection des variables explicatives en amont de la forêt aléatoire

Le principe de ce type d'analyse se base sur la segmentation, elle permet la construction d'un arbre de décision (figure 15). Le principe est de pouvoir rechercher la variable qui explique le mieux la moucheture, ainsi la population étudiée est divisée en 2 segments selon la variable la plus explicative, pour chacune des sous populations formées, la même opération est reproduite, la sous population est encore divisée en 2 selon une autre variable explicative et ainsi de suite, ici il s'agit du principe pour un seul arbre. Pour la forêt aléatoire, plusieurs arbres sont simulés en sachant qu'à chaque arbre correspond un échantillon aléatoire de la population. Au final une moyenne de tous les arbres permet de voir quelle est la variable explicative la plus influente sur les variations du taux de moucheture. En plus de la forêt aléatoire 2 types de graphiques sont donnés. Le premier type donne le taux de moucheture en fonction des variables explicatives les plus influentes et le deuxième type illustre l'interaction entre chacune des variables explicatives. Cette démarche permet dans un premier temps de pouvoir faire la sélection des variables explicatives les plus intéressantes pour la suite de l'analyse.

#### *Une préparation des données avant l'utilisation de la forêt aléatoire*

Il s'est avéré qu'un tri et une préparation des données était nécessaire avant le test de la forêt aléatoire (figure 16), en effet si les variables explicatives avaient trop peu (<5) ou bien trop (>52) de modalités le test ne pouvait pas se faire pour ces dernières. De ce fait de nombreuses variables de la base de données ont été exclues, telles que : la date de semis et d'épiaison, la station météo, le site, le type de sol, les modalités de fertilisation, les analyses flores. Le problème étant que parmi les variables exclues se trouvaient la variété et les modalités de traitement fongicide, potentiellement influents sur la moucheture, selon la bibliographie. Pour pouvoir quand même intégrer ces facteurs dans la forêt aléatoire, l'idée a été de faire des regroupements en catégories, afin de diminuer le nombre de modalités.
Ainsi, au lieu de prendre en compte la variété, c'est la note de sensibilité à la moucheture qui a été ajoutée à la base de données, et pour les traitements fongiques c'est un taux d'efficacité théorique sur *Microdochium* qui sera pris en compte. Ce taux a été obtenu à partir des modalités de traitement fongique pour chacun des essais à dires d'expert.

Ensuite, un tri parmi les variables qui ont été sélectionnées sur la base de données manquantes a été fait. En effet pour certaines variables le nombre de données manquantes allait jusqu'à plus de 6740 pour 8129 observations. Donc Les variables concernant les modalités d'irrigation et la quantité d'eau irriguée ont été exclues. En revanche malgré le fait qu'il y ait un grand nombre de données manquantes pour les variables météo, soit 3065 elles sont retenues car elles font parties des causes potentiels de la moucheture citées par la littérature. Afin de ne pas prendre en compte les données météorologiques manquantes, tous les essais CTPS ont été exclus car il s'agit des essais représentant une grande proportion des données manquantes

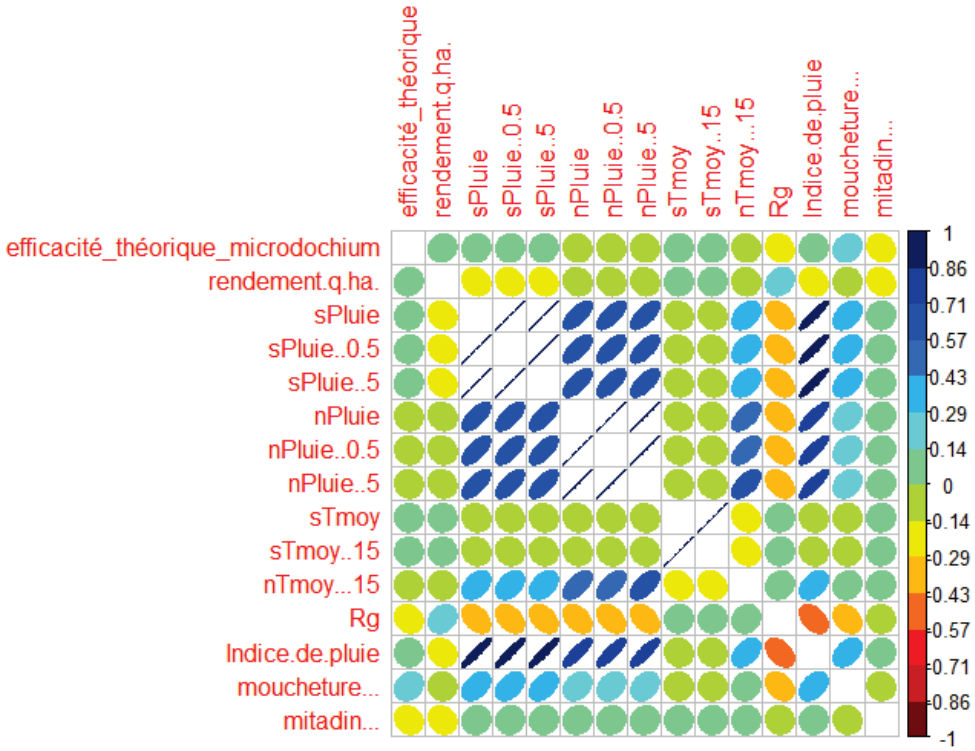



**Figure 17** : matrice de corrélation entre variables quantitatives retenues suite à la suppression des variables comportant trop de données manquantes. Le gradient de couleur correspond à différente s valeurs de coefficient de corrélation

Enfin sur les variables finalement choisies, une matrice de corrélation (figure 17) a été utilisée pour repérer les variables quantitatives qui étaient fortement corrélées entre elles et donc redondantes, car elles apportent la même information à l'analyse. Concernant la lecture de la matrice, plus la couleur et foncée (rouge ou bleu) plus l'ellipse est fine et plus le coefficient de corrélation se rapproche de 1. On a donc au final toutes les variables de somme de pluie avec une corrélation de 1 entre elles, il en est de même pour le nombre de jours où il a plu ainsi que pour la somme de température. Ainsi, les variables paraissant les plus discriminantes ont été choisies, à savoir : sPluie >0.5, nPluie >0.5 et sTmoy>15°. De plus, il est possible de voir les corrélations du taux de moucheture avec les autres variables. Il apparaît que les variables météo telles que la somme de pluie ou de l'indice de pluie sont les plus corrélées avec le taux de moucheture. Ce qui correspond aux hypothèses faites dans la bibliographie.

### b) Création d'un modèle linéaire sur les variables retenues et spécification des éventuelles interactions

Une fois la forêt aléatoire faite, les variables explicatives qui méritent d'être testées au sein du modèle ont été sélectionnées. Pour cela la sélection se fait sur la base de croisement de plusieurs résultats. En effet, la forêt aléatoire donne les variables explicatives les plus influentes, mais aussi par les biais des graphiques il est possible de voir l'effet de ces mêmes variables sur le taux de moucheture. Enfin, il est également important de pouvoir sélectionner les variables sur la base des connaissances agronomiques afin de garder un lien logique avec le taux de moucheture. En complément une matrice de corrélation entre variables quantitatives de la forêt aléatoire est faite afin d'identifier les interactions pouvant potentiellement influer le taux de moucheture. La qualité des résidus ne permettant pas de faire une analyse sur un modèle linéaire classique, le choix s'est donc porté sur un modèle linéaire généralisé, car celui-ci permet de faire une analyse de variance même si les résidus ne suivent pas les postulats imposés (distribution normale, égalité des variances, et indépendance)

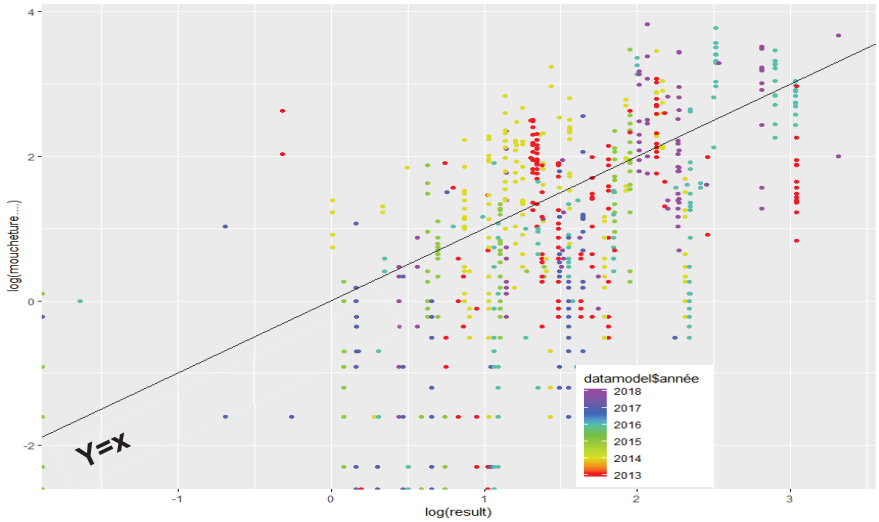



**Figure 18** : Graphique du log (moucheture observé) en fonction du log (moucheture prédit) (ici log (result)) avec les années représentées en couleur (de 2013 à 2018) (à partir de la base de données moucheture)

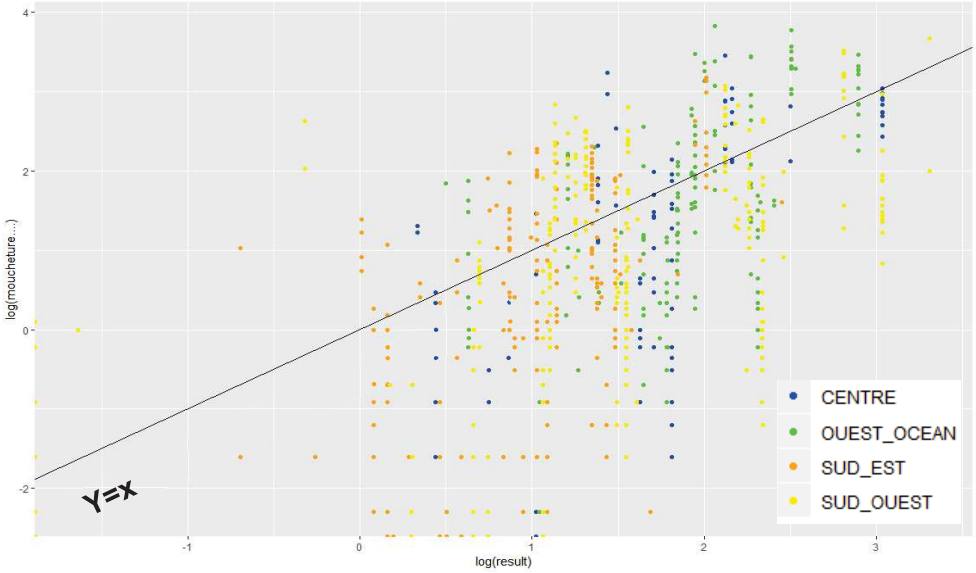



**Figure 19** : Graphique du log (moucheture observé) en fonction du log (moucheture prédit) de 2013 à 2018, avec les bassins de production représentés en couleur (à partir de la base de données moucheture)

**Tableau 18** : Tableau récapitulatif du minimum, maximum, médiane, moyenne et écart type pour chacun des bassins de production de blé dur (à partir de la base de données moucheture)

| bassin production | minimum | maximum | moyenne | médiane | écart-type |
|---|---|---|---|---|---|
| Centre | 0 | 31.8 | 6.64 | 3.9 | 7.16 |
| Ouest océan | 0.1 | 45.8 | 8.98 | 4.7 | 10.13 |
| Sud est | 0 | 24 | 3.13 | 1.75 | 4.01 |
| Sud ouest | 0 | 39.6 | 5.13 | 3.25 | 6.13 |
| NATIONAL | 0 | 45.8 | 5.6 | 2.8 | 7.19 |

## IV) *Résultats et discussion*

### *1) Résultats de l'étude de la performance du modèle moucheture*

Comme il a été dit, une confrontation des données moucheture de la base des années 2013 à 2018 à celles prédites par le modèle moucheture, été étudiée de façon qualitative avec des graphiques, puis quantitative sur la base de calcul d'indicateurs de performance du modèle. Concernant les résultats graphiques c'est le log du taux de moucheture observé en fonction de celui prédit qui a été représenté. Les taux sont sous forme de logarithme pour que les variations soient plus visibles. Sur les graphique la droite noire est celle ayant pour équation y=x, c'est donc le cas pour lequel les valeurs de mouchetures prédites sont exactement celles observées. Sur le 1$^{er}$ graphique (figure 18) les couleurs distinguent les années d'observation. Il en ressort déjà qu'il y a bien une relation entre le taux de moucheture prédit et observé, malgré le fait que le nuage de point suit la tendance de la droite, des écarts importants peuvent être observés, indiquant des prédictions par le modèle non fiables. En effet, les taux prédits par le modèle sont moins variables que ceux observés, pour des taux différents observés dans la réalité, le modèle ne fera pas la différence et aura tendance à prédire une même valeur (d'où la présence de plusieurs rangées de points alignés (figure 18)).

Concernant les années il n'y a pas vraiment de tendances qui se dégagent. Le 2$^{ème}$ graphique est le même que le précédent, mais ici la coloration distingue cette fois-ci les 4 bassins de production (figure 19), des regroupements de points peuvent être observés selon les bassins. Il apparaît que les points du bassin Sud Est (orange) sont plus concentrés vers de faibles valeurs, et ceux de l'Ouest océan (vert) vers de fortes valeurs tandis que pour les autres bassins de production Centre et Sud-Ouest les valeurs des taux de moucheture apparaissent comme étant dispersées. Ces tendances correspondent aux valeurs moyennes, minimum, maximum et médiane du taux de moucheture observé pour chacun des lieux de production (tableau 18), la moyenne est bien plus élevée pour le bassin Ouest Océan avec 8.98 %, et plus faible pour le Sud Est avec 3.13%, de même pour les valeurs des médianes mais en moins marquée (Ouest Océan : 4.7 et Sud Est : 1.75), car la médiane est moins influencée par les valeurs extrêmes Il apparaît graphiquement que les prédictions du modèle sont plutôt moyennes, de ce fait il a fallu quantifier la qualité de prédiction, afin de voir si cela correspond à ce qui est observé graphiquement.

**Tableau 19** : Tableaux de contingence du taux de moucheture prédit face à celui prédit selon les 2 découpages de classes (A et B)

**A**

| tauxmouch.obs \ tauxmouch.pred | [0,2] | (2,5] | (5,15] | (15,50] |
|---|---|---|---|---|
| [0,2] | 91 | 149 | 68 | 0 |
| (2,5] | 12 | 80 | 61 | 9 |
| (5,15] | 5 | 85 | 81 | 13 |
| (15,50] | 0 | 4 | 39 | 24 |

**B**

| tauxmouch.obs \ tauxmouch.pred | [0,2] | (2,10] | (10,40] | (40,50] |
|---|---|---|---|---|
| [0,2] | 91 | 197 | 20 | 0 |
| (2,10] | 16 | 243 | 34 | 0 |
| (10,40] | 1 | 73 | 44 | 0 |
| (40,50] | 0 | 1 | 1 | 0 |

**Tableau 20** : Récapitulatif des taux de mauvais classement par le modèle moucheture par classe et selon les découpages 1 et 2

| | classes | taux de mauvais classement (%) |
|---|---|---|
| **découpage 1** | 0-2% | 70 |
| | 2-5% | 51 |
| | 5-15% | 56 |
| | >15% | 64 |
| | **général** | **62** |
| **découpage 2** | 0-2% | 70 |
| | 2-10% | 17 |
| | 10-40% | 63 |
| | >40% | 100 |
| | **général** | **48** |

**Tableau 21** : Récapitulatif des taux de mauvais classement par le modèle moucheture selon le découpage de type 2 et par bassin de production

| bassin production | classes | taux de mauvais classement (%) |
|---|---|---|
| **CENTRE** | 0-2% | 76 |
| | 2-10% | 10 |
| | 10-40% | 46 |
| | >40% | |
| | **général** | **49** |
| **OUEST_OCEAN** | 0-2% | 89 |
| | 2-10% | 25 |
| | 10-40% | 50 |
| | >40% | 100 |
| | **général** | **47** |
| **SUD_OUEST** | 0-2% | 77 |
| | 2-10% | 23 |
| | 10-40% | 72 |
| | >40% | |
| | **général** | **54** |
| **SUD_EST** | 0-2% | 56 |
| | 2-10% | 11 |
| | 10-40% | 100 |
| | >40% | |
| | **général** | **40** |

Dans un premier temps c'est le pourcentage de mauvais classement par le modèle qui a été établi sur la base de tableau de contingence, du taux de moucheture prédit face à celui observé. De fait, des prédictions de taux de moucheture qui ne sont pas toujours fiables (tableau 19), ainsi les valeurs prédites peuvent être très éloignées de ce qui est observé en réalité. En effet pour le (tableau 19A), pour des taux de moucheture observées entre 0 et 2 % le modèle va effectivement prédire des taux entre 0 et 2% (avec 91 valeurs prédites), mais aussi (et en majorité) des taux compris entre 2 et 5% (149 valeurs prédites) et également entre 5 et 15% (68 valeurs prédites). Pour une classe de taux de moucheture en particulier, le modèle va fournir des valeurs de plusieurs classes à la fois l'écart pouvant aller jusqu'à 12% (dans le cas du premier type de découpage de classes).

En ce qui concerne le taux de mauvais classement selon les deux types de découpage de classe (tableau 20). Le taux général de mauvais classement est moins élevé pour le découpage 2 avec 48% de taux de moucheture mal classés au total (contre 62% pour le découpage 1). Au vu des résultats généraux, la qualité de prédiction du modèle apparaît comme étant mauvaise en effet il aura tendance à se tromper à peu près une fois sur deux. Le modèle a également tendance à faire de moins bonnes prédictions pour des découpages de classe plus précis, comme le découpage 1. En regardant dans le détail ce tableau la classe 0-2% apparaît avec le plus fort taux de mauvais classement qui est de 70% contrairement à la classe 2-10% qui présente un taux de mauvais classement de 17%. Le modèle a de grandes difficultés à classer les valeurs extrêmes, globalement les trop faibles taux moucheture (inférieur à 2%), et les trop forts taux (supérieurs à 15%). Ici les classes 0-2% et 2-5% sont mal prédites, or ce sont des valeurs seuils intéressantes car ce sont les valeurs contractuelles les plus souvent rencontrées. Le même type de tableau a été fait mais selon les bassins de production suivant le découpage 2 (tableau 21). Le taux de mauvais classement pour chacun des bassins de production va de 40% à 54%, les taux de mauvais sont à peu près similaires pour les 4 bassins, avec un taux légèrement plus faible pour le Sud-Est et plus élevé pour le bassin Sud-Ouest. Là encore, c'est la classe [2-10%] qui apparaît avec des taux de mauvais classement les plus faibles (de 11 à 25%), et les taux de moucheture inférieurs à 2% et supérieur à 10% sont en majorité mal classés par le modèle et ce, pour tous les bassins de production.

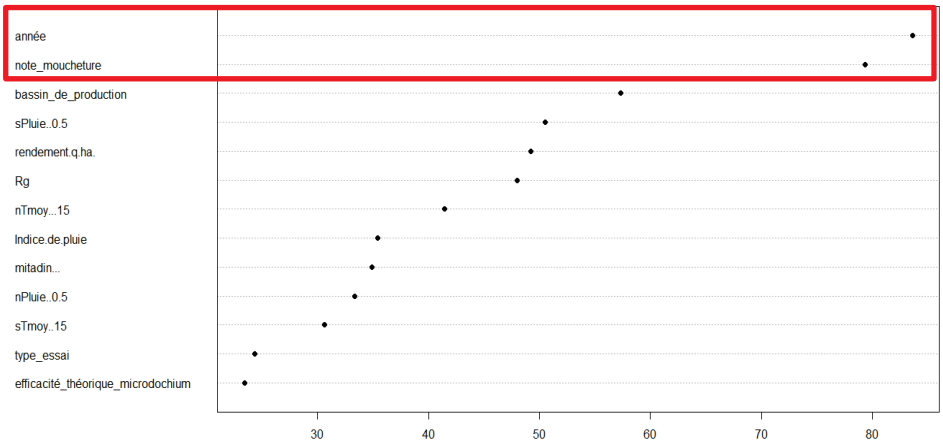
**Tableau 22** : Récapitulatif des indicateurs de performance du modèle moucheture par bassin de production, ainsi que pour tous les bassins confondus (national)

| bassin de production | biais | rmse | efficience |
|---|---|---|---|
| CENTRE | -0.26 | 5.55 | 0.39 |
| OUEST OCEAN | 1.38 | 8.54 | 0.28 |
| SUD EST | -0.01 | 3.28 | 0.33 |
| SUD OUEST | -1.10 | 6.18 | -0.02 |
| NATIONAL | -0.13 | 6.08 | 0.29 |

**Tableau 23** : Récapitulatif des indicateurs de performances par classes selon les découpages de classe 1 et 2

| | classes | biais | rmse | efficience |
|---|---|---|---|---|
| découpage 1 | 0-2% | -2.79 | 3.62 | -32.97 |
| | 2-5% | -2.31 | 4.77 | -29.87 |
| | 5-15% | 2.03 | 5.27 | -2.74 |
| | >15% | 11.47 | 14.34 | -3.36 |
| découpage 2 | 0-2% | -2.79 | 3.62 | -32.97 |
| | 2-10% | -0.55 | 4.73 | -3.58 |
| | 10-40% | 8.04 | 10.74 | -1.28 |
| | >40% | 34.57 | 34.73 | -911.04 |

Dans un deuxième temps un calcul des indicateurs de performance du modèle est effectué, dans le but de pouvoir appuyer les conclusions ressortant de ce qui a été graphiquement observé ainsi qu'au travers des taux de mauvais classement. Le premier tableau (tableau 22) donne les valeurs du biais, de la rmse, ainsi que de l'efficience du modèle moucheture, selon les bassins de production. Le biais (moyenne des écarts (observé-prédit)) de tous les lieux confondus est négatif (-0.13), donc en général il y a une tendance du modèle à surestimer par rapport à ce qui est observé. De même des valeurs négatives sont observées pour le Centre (-0.26), Sud Est (-0.01) et Sud-Ouest (-1.10) alors que pour le bassin Ouest Océan le biais est positif (1.38).Donc pour le bassin Ouest Océan, le modèle a tendance à sous-estimer le taux de moucheture par rapport à ce qui est observé.
En effet, il a été vu auparavant qu'il s'agit du bassin pour lequel le taux de moucheture moyen est le plus élevé. Pour ce même tableau les rmse vont de 3.28 à 8.54 et les efficiences de -0.02 à 0.39. Tout en sachant que la rmse doit être la plus proche possible de 0 et l'efficience de 1, il est considéré au regard des valeurs obtenues que la qualité de prédiction suivant les bassins de production est plutôt moyenne. Le deuxième tableau calcule les mêmes indicateurs de performance mais selon les mêmes classes pour lesquelles les taux de mauvais classement ont été donnés (tableau 23). Concernant les biais, pour les 2 types de découpage, plus les classes comportent des valeurs extrêmes de moucheture et plus le biais augmente, ce qui montre la difficulté du modèle à faire des prédictions pour des taux de moucheture qui sont soit trop petits (la classe 0-2%) ou bien trop grand (les classes > 15% et >40%). De plus, les biais sont négatifs pour les classes de faibles taux de moucheture de 0-2%, 2-5% et 2-10% et positifs pour les forts taux de 5-15%, >15%, 10-40% et >40% il y a donc une tendance du modèle à surestimer les faibles taux de moucheture et une tendance à sous-estimer les forts taux. Selon les classes, la rmse va de 3.62 à 34.73 et l'efficience de -1.28 à -911.04, au vu de ces résultats la qualité de prédiction est plutôt mauvaise et moins bonne que celle pour les bassins de production. Car en effet, le modèle prend en compte des corrections selon le bassin de production où la moucheture a été mesurée. Là encore les plus mauvais indicateurs sont observés avec les classes intégrant des valeurs extrêmes de moucheture c'est-à-dire : 0-2%, >15%, >40%.




| | %IncMSE |
|---|---|
| année | 83.61 |
| bassin_de_production | 57.32 |
| type_essai | 24.33 |
| note_moucheture | 79.35 |
| efficacité_théorique_microdochium | 23.41 |
| rendement.q.ha. | 49.18 |
| mitadin... | 34.90 |
| sPluie..0.5 | 50.53 |
| nPluie..0.5 | 33.34 |
| nTmoy...15 | 41.46 |
| sTmoy..15 | 30.65 |
| Rg | 47.99 |
| Indice.de.pluie | 35.39 |

**Figure 20** : Résultats de la forêt aléatoire après la sélection des variables explicatives

Pour conclure sur l'évaluation des performances du modèle, en général et sans considérer les bassins de production et les découpages de classe, la qualité de prédiction est plutôt moyenne. D'une part en considérant les bassins de production, les tendances principales qui sont observées sont conservées c'est-à-dire qu'en général des forts taux de moucheture sont prédits pour le bassin Ouest Océan et de faibles taux pour le bassin Sud Est. En effet, ce sont les tendances qui sont observées en réalité. En revanche, le modèle présente une surestimation qui est majoritaire pour la plupart des bassins de production, excepté le bassin Ouest Océan pour lequel il y a une sous-estimation, car c'est la zone pour laquelle les taux de moucheture sont plus élevés que la moyenne. Concernant les prédictions suivant les classes, il est remarqué que c'est une classe ciblée qui aura tendance à bien être prédite, celle pour les taux de moucheture de 2 à 10%. En revanche pour les classes plutôt extrêmes le modèle fait de mauvaises prédictions, en effet il a tendance à surestimer les faibles taux de moucheture et sous-estimer les forts taux. Au vu des résultats, il apparaît que les facteurs pris en compte ne sont pas suffisant pour expliquer les variations du taux de moucheture. Cela explique la démarche suivante, à savoir un travail d'analyse statistique sur une base de données prenant en compte plus de facteurs, afin de pouvoir tester si le fait de prendre en compte plus de facteurs expliquerait mieux le phénomène de la moucheture.

### 2) *Résultats des analyses statistiques faites de la base de données moucheture*

#### a) Utilisation de la forêt aléatoire pour la sélection des variables explicatives les plus liées au taux de moucheture

La forêt aléatoire donne pour chacune des variables explicatives le pourcentage d'augmentation de la MSE (Mean Square Error) (= %IncMSE), c'est l'augmentation de l'erreur sur la prédiction du taux de moucheture, lors de la perturbation de la variable explicative. De fait, plus ce pourcentage est grand et plus la variable explicative sera liée à la variable à expliquer c'est-à-dire le taux de moucheture. Car en effet plus les deux variables seront liées et plus un changement sur l'une aura des conséquences sur l'autre. Sur la figure de sortie (figure 20) de la forêt aléatoire les variables explicatives choisies sont classées suivant le pourcentage d'augmentation de la MSE croissant (en allant du bas vers le haut). La forêt aléatoire explique ici 67.37% de la variabilité du taux de moucheture. Ici 2 variables explicatives se distinguent des autres à savoir, la note moucheture (= note de sensibilité à la moucheture) avec un %IncMSE de 79.35% et l'année avec un %IncMSE de 83.61%, ce sont donc des variables qui sont très liées au taux de moucheture. D'autres variables apparaissent comme étant les moins influentes avec un %IncMSE étant inférieur à 50%, tels que le type d'essai, la somme des températures inférieur à 15°C ainsi que l'efficacité théorique du traitement fongicide sur *Microdochium.* Parallèlement à ces résultats il est également possible de voir graphiquement, l'effet des principales variables explicatives sur le taux de moucheture. Pour cela ce sont des graphiques de l'évolution du taux de moucheture en fonction des valeurs des variables explicatives qui sont fournies.

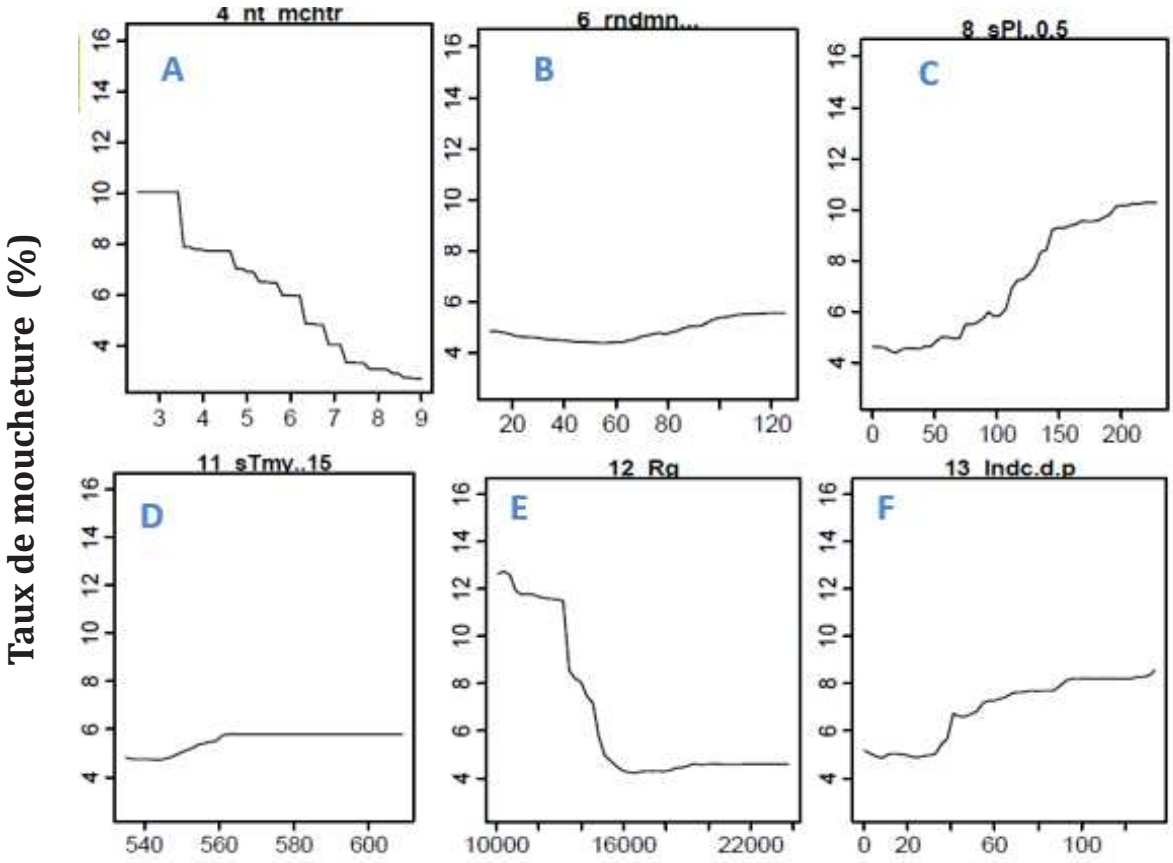



**Figure 21** : représentation graphique de l'évolution moyenne du taux de moucheture en fonction des variables explicatives (A : note moucheture, B : rendement (q/ha), C : sPluie>0.5 mm (mm), D : sTmoy>15 °C(°C),E : Rg(W/m²), F : Indice de pluie(mm))

Le premier graphique (figure 21 A) montre l'influence de la note de sensibilité variétale moucheture sur le taux de moucheture. Plus la note de sensibilité augmente et plus le taux de moucheture diminue. Les taux de moucheture observés correspondent bien à la logique des notes de sensibilité variétale en général, car plus cette note est élevée et plus la variété est tolérante à la moucheture. Concernant l'effet de la somme des pluies >0.5 mm (figure 21 C), il apparaît une augmentation du taux de moucheture suivant la somme des pluies, cette croissance est plus remarquable pour des sommes allant de 0 à 150 mm, car après 150 mm le taux de moucheture semble stagner. Concernant le rayonnement global (figure 21 E), plus ce rayonnement augmente et plus le taux de moucheture diminue, et cette décroissance est plus visible pour des valeurs de rayonnement global allant de 13000 à 18000 W/m² au-delà ou en dessous de ces valeurs, le taux de moucheture semble stagner. Pour l'indice de pluie, l'évolution est similaire à celle de la somme des pluies >0.5 mm. Plus l'indice augmente et plus le taux de moucheture augmente jusqu'à atteindre un plateau à un indice de pluie de 100. Il en est de même pour l'effet de variable somme des températures moyennes >15°C, plus elle augmente et plus le taux de moucheture augmente et atteint un seuil de à 560 °C. En revanche la variable rendement présentait un fort %IncMSE lui donnant le statut de variable explicative très liée au taux de moucheture, mais au regard de la représentation graphique, l'effet du rendement sur le taux de moucheture apparaît comme étant faible (figure 21 B). Néanmoins, il faut prendre en compte le fait que ces graphiques représentent la moyenne du taux de moucheture pour chacune des modalités de la variable à expliquer, ce qui peut estomper des éventuelles variations. Les résultats de la forêt aléatoire sont en concordance avec ce qui a été trouvé dans la littérature, à savoir un effet de la sensibilité variétale à la moucheture, mais également des variables météorologiques. Ces dernières ont toute en commun des valeurs seuils pour lesquelles la moucheture n'évolue plus. Ce qui pourrait être dû au fait que les symptômes de moucheture n'apparaissent que sous certaines conditions d'humidité et de température. Néanmoins, ces résultats n'ont pas pris en compte la part de la flore fongique sur la moucheture. En effet il n'était pas possible de les intégrer car que le nombre de données manquantes ainsi que le nombre de modalités n'étaient pas adaptés. C'est pour cela qu'une analyse à part a été faite sur les essais qui présentaient des données flore afin d'avoir une idée de l'influence de ces variables.

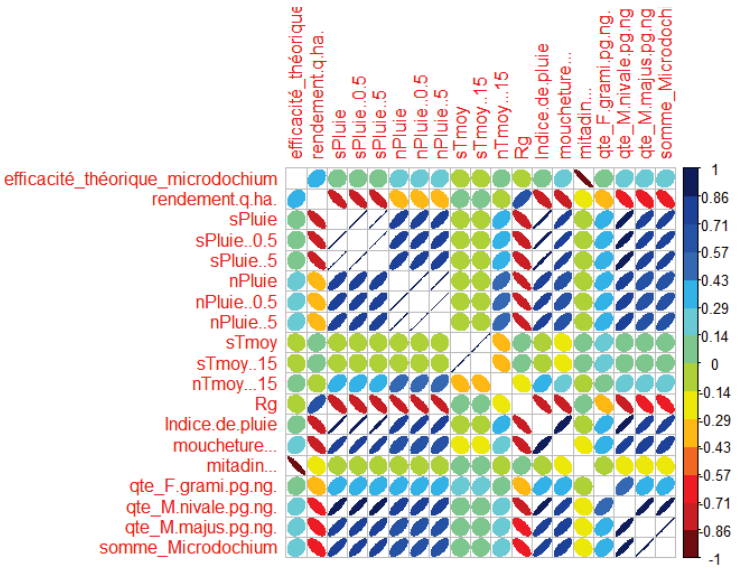



**Figure 22** : matrice de corrélation des variables quantitatives, prenant en compte les données de flore fongique

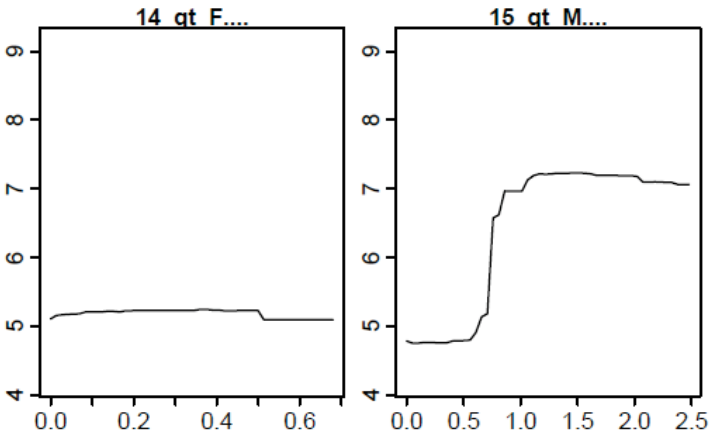
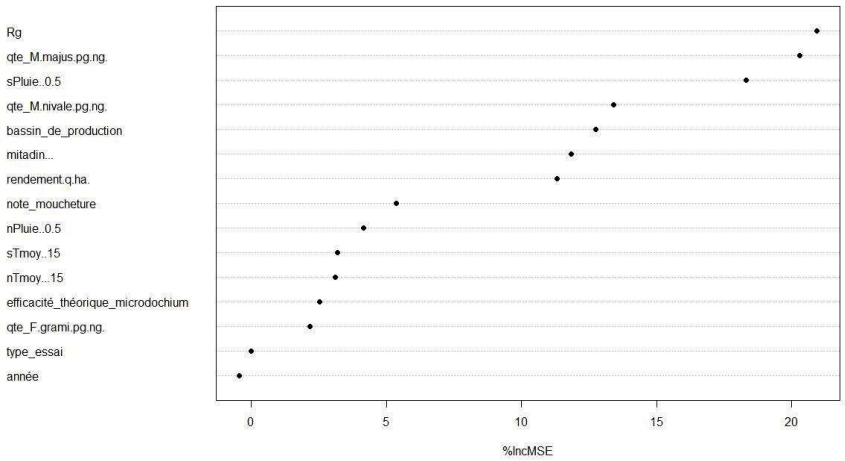



**Figure 23** : graphiques de l'évolution du taux de moucheture en fonction de la quantité d'ADN (pg/ng) de F.graminearum (gauche) et M.majus (gauche) (à partir de la forêt aléatoire)




| | %IncMSE |
|---|---|
| année | -0.44 |
| bassin_de_production | 12.74 |
| type_essai | 0.00 |
| note_moucheture | 5.36 |
| efficacité_théorique_microdochium | 2.53 |
| rendement.q.ha. | 11.31 |
| mitadin... | 11.84 |
| sPluie..0.5 | 18.31 |
| nPluie..0.5 | 4.16 |
| nTmoy...15 | 3.10 |
| sTmoy..15 | 3.18 |
| Rg | 20.93 |
| qte_F.grami.pg.ng. | 2.16 |
| qte_M.nivale.pg.ng. | 13.40 |
| qte_M.majus.pg.ng. | 20.29 |

**Figure 24** : résultats de la forêt aléatoire sur les données moucheture des essais comportant des données de flore fongique

### b) Etude focalisée sur les essais présentant des données flore

La forêt aléatoire a été faite de nouveau pour les essais ayant des analyses de flore fongiques. La même démarche a été faite au préalable avec une sélection des variables adaptées et également les variables redondantes ont été supprimées à l'aide d'une matrice de corrélation (figure 22). L'indice de pluie est très corrélé à la somme de pluie, et la somme de quantité d'ADN de *Microdochium* à la quantité d'ADN de *M.majus et M.nivale.* Finalement les variables *« indice de pluie » et « Somme Microdochium »* ont été supprimées de l'analyse pour la forêt aléatoire. De plus, cette matrice montre également les éventuelles corrélations qu'il pourrait y avoir entre le taux de moucheture et les autres variables quantitatives. En effet, ici deux groupes de variables sont corrélées à la moucheture, à savoir les variables météorologiques telles que la pluviométrie et le rayonnement global. L'autre groupe de variable concerne les données sur les champignons. Une augmentation de la moucheture apparaît ici comme étant corrélée à une augmentation de la pluviométrie, et de la quantité de champignon et une baisse du rayonnement global. En ce qui concerne la forêt aléatoire obtenue, le pourcentage d'explication est cette fois-ci de 77.79% (figure 23). Les %IncMSE sont plus faibles mais néanmoins des facteurs se distinguent des autres et c'est le rayonnement global qui arrive en première position avec un %IncMSE de 20.93% suivi de la somme de la quantité d'ADN de *M.majus* avec 20.29% et de la somme des pluies >0.5 mm avec 18.31%. Ces résultats correspondent aux corrélations observées, c'est-à-dire l'influence à la fois des variables météorologiques et fongiques, sur la moucheture. Si l'on s'intéresse à l'effet de la quantité d'ADN de *M.majus* et de *Fusarium* (figure 24). Pour *M.majus* plus la quantité d'ADN augmente et plus le taux de moucheture augmente, en effet pour une quantité d'ADN allant de 0 à 1 pg/ng le taux de moucheture augmente de 2% alors pour *F.graminearum* il n'y a quasiment pas d'évolution. Comme ce qui a été vu dans la forêt aléatoire l'effet de *M.majus* sur le taux de moucheture est plus visible que pour *F.graminearum.* Ces résultats montrent que lorsqu'on prend en compte les données concernant la flore fongique, les variables *Microdochium* et météorologiques se distinguent des autres et semblent davantage liées aux taux de moucheture.

### c) Modèle linéaire généralisé avec les variables explicatives retenues

#### Premier modèle linéaire en considérant la base de données générale

Après avoir visualisé l'importance potentielle des variables explicatives sur le taux de moucheture. L'idée a été de pouvoir créer un modèle pouvant expliquer les variations du taux moucheture après avoir fait un choix des variables explicatives à intégrer. 2 modèles linéaires généralisés ont été créés. Le premier modèle prend en compte la base de données en générale et donc, grâce à l'analyse de la première forêt aléatoire, les variables explicatives les plus intéressantes ont été choisies, au final l'équation du premier modèle prend en compte les variables : notes_moucheture, année, bassin_de_production, sPluie>0.5mm, Rg, nTmoy>15°C, Indice_de_pluie, efficacité_théorique_microdochium, rendement et mitadin.

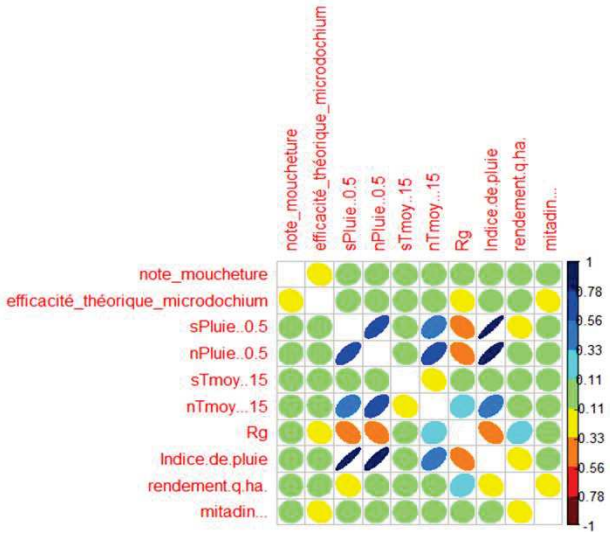



**Figure 24** : matrice de corrélation des variables quantitative intégrées dans la forêt aléatoire

```
Analysis of Deviance Table (Type III tests)

Response: (moucheture.../100)
                                  LR Chisq Df Pr(>Chisq)
note_moucheture                     634.88  1  < 2.2e-16 ***
année                               558.34 21  < 2.2e-16 ***
bassin_de_production                278.67  3  < 2.2e-16 ***
sPluie..0.5                          32.14  1  1.437e-08 ***
Rg                                    4.77  1   0.028881 *
nTmoy...15                           17.35  1  3.107e-05 ***
Indice.de.pluie                      20.65  1  5.509e-06 ***
efficacité_théorique_microdochium    10.48  1   0.001204 **
rendement.q.ha.                       1.50  1   0.220934
mitadin...                           63.07  1  1.997e-15 ***
sPluie..0.5:Rg                        9.19  1   0.002437 **
sPluie..0.5:nTmoy...15               10.35  1   0.001295 **
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

**Figure 25** : résultats de l’analyse de variance du 1er modèle linéaire généralisé

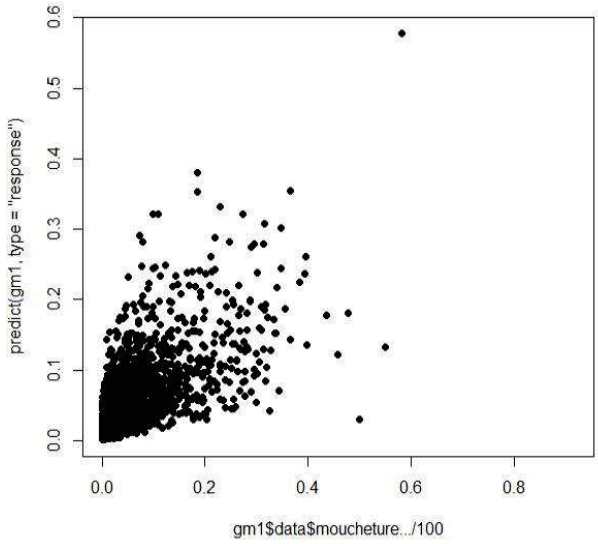



**Figure 26** : graphique de la relation entre le taux de moucheture prédit par le modèle linéaire généralisé et celui observé

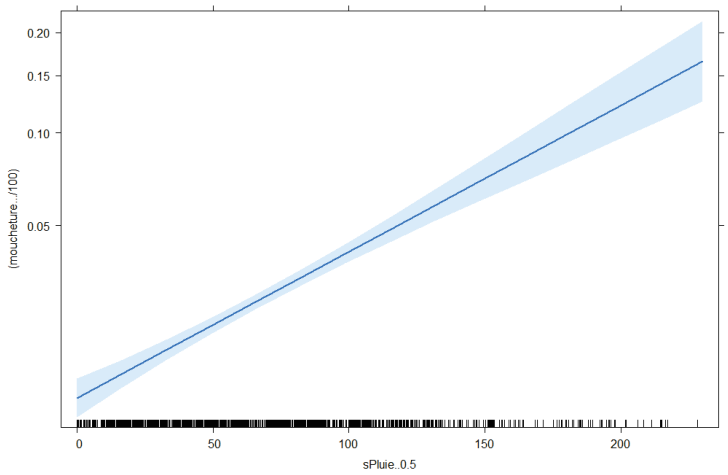



**Figure 26** : graphique du taux de moucheture prédit par le modèle en fonction de la somme des pluies >0.5 mm

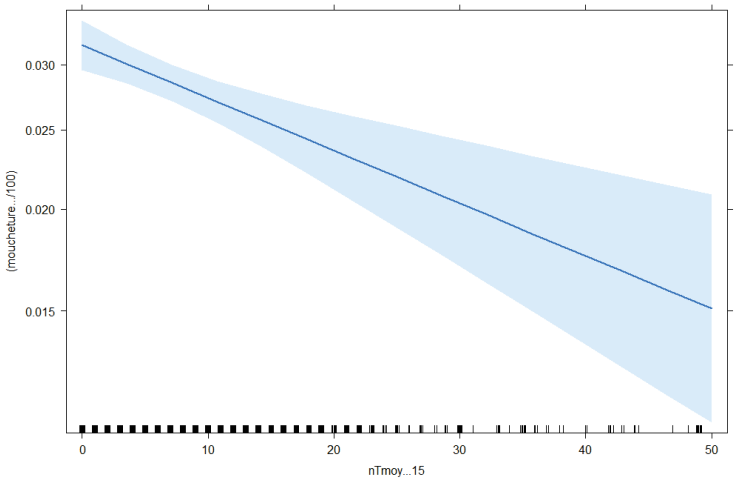



**Figure 27 :** graphique du taux de moucheture prédit par le modèle en fonction de la somme des jours de températures moyennes >15°C

Une matrice de corrélation des variables sélectionnées a été faite pour repérer d'éventuelles interactions pouvant influencer le taux de moucheture (figure 24). Celles qui ont été testées sont celles entre sPluie>0.5 mm et nTmoy>15°C, en effet il s'agit du type d'interaction souvent cité dans la littérature et dans la matrice les deux variables présentent une corrélation positive entre 0.5 et 0.7. L'autre interaction est celle entre Rg et sPluie>0.5mm, dans la matrice de corrélation les 2 variables sont corrélées négativement. Quant aux résultats de l'analyse (figure 25) il apparaît que la plupart des variables apparaissent comme ayant un effet significatif sur le taux de moucheture et en particulier la note moucheture, l'année, le bassin de production, sPluie>0.5 mm, nTmoy>15°C, l'indice de pluie, et le taux de mitadin. En revanche le rendement n'a pas d'effet significatif sur la moucheture alors qu'il faisait partie des variables les plus liées au taux de moucheture dans la forêt aléatoire. Enfin les interactions entre Rg et sPluie>0.5mm et entre nTmoy et sPluie ont un effet significatif sur la moucheture. Ensuite, un graphique entre les taux de moucheture observés et prédits par le modèle linéaire généralisé a été construit (figure 26), dans le but de voir si une relation se dégageait. Il en ressort qu'il n'y a pas de tendance claire, un tassement des points est observé vers les petites valeurs de moucheture. Cela pourrait signifier que les facteurs qui ont été intégrés au modèle ne sont pas suffisants pour la prédiction du taux de moucheture.

Néanmoins des graphiques des prédictions du taux de moucheture selon les modèles en fonction des variables explicatives choisies ont été faites afin de se faire une idée sur les tendances prédites par le modèle afin de voir si une logique était quand même conservée. Le premier graphique (figure 27) représente le taux de moucheture prédit par le modèle linéaire généralisé en fonction de la somme de température >15°C, globalement plus la température augmente et plus le taux de moucheture diminue. L'autre graphique (figure 28) représente le taux de moucheture prédit en fonction de la somme des pluies >0.5mm, plus la somme des pluies augmente et plus le taux de moucheture croît. Ces résultats montrent le fait que le taux de moucheture à tendance à augmenter lorsque la température baisse et la pluviométrie augmente, conclusion qui correspond bien à ce qui a été vu dans la bibliographie.

Pour conclure sur les résultats du premier modèle, ce sont principalement les variables concernant la météo, la localisation, la sensibilité variétale et le mitadin qui apparaissent comme ayant un effet significatif sur le taux de moucheture. On peut également s'interroger sur la cohérence de ces résultats par rapport aux recherches déjà faites sur la moucheture, car le taux de mitadin est rarement corrélé à la moucheture dans la littérature. Le lien qui lie moucheture et mitadin pourrait être les conditions climatiques. Car en effet la première cause du mitadin (35 à 50%) est le climat juste avant récolte et notamment les fortes pluies. Néanmoins le modèle garde une certaine cohérence avec les résultats obtenus auparavant sur la moucheture à savoir un effet significatif de l'interaction entre le cumul de pluie et de température sur le taux de moucheture.

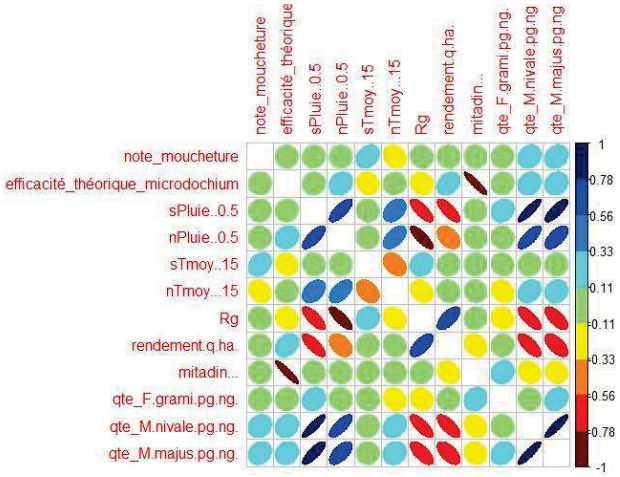



**Figure 28** : matrice de corrélation entre les variables quantitatives sélectionnées pour la forêt aléatoire

```
Analysis of Deviance Table (Type III tests)

Response: (moucheture.../100)
                                LR Chisq Df Pr(>Chisq)
note_moucheture                 10.9780  1   0.000922 ***
bassin_de_production             5.6359  3   0.130730
sPluie..0.5                      0.1531  1   0.695557
Rg                               0.7806  1   0.376955
rendement.q.ha.                  2.1826  1   0.139582
mitadin...                       3.1694  1   0.075029 .
qte_M.nivale.pg.ng.              0.1031  1   0.748124
qte_M.majus.pg.ng.               4.2065  1   0.040270 *
Rg:qte_M.majus.pg.ng.            6.4381  1   0.011170 *
sPluie..0.5:qte_M.majus.pg.ng.   0.5424  1   0.461423
sPluie..0.5:Rg                   0.1291  1   0.719348
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

Figure 29 : Résultats de l’analyse de variance du 2ème modèle linéaire généralisé

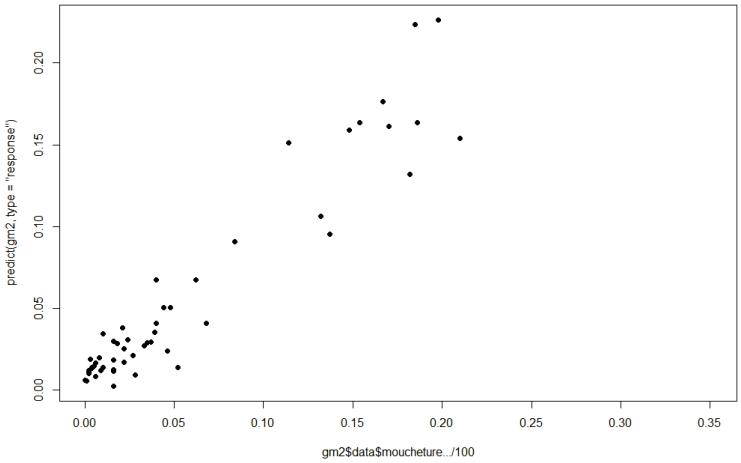



**Figure 30** : graphique de la relation entre le taux de moucheture prédit et celui estimé par le 2ème modèle linéaire généralisé

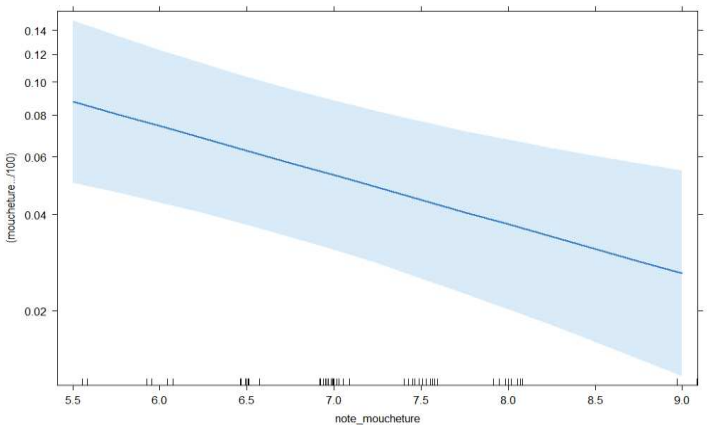



**Figure 21** : graphique de l’évolution du taux de moucheture prédit par le modèle généralisé en fonction de la note de sensibilité variétale

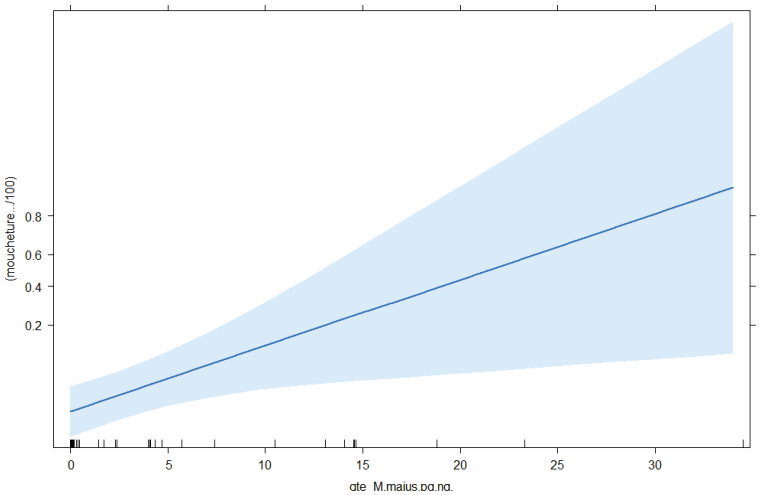



**Figure 32** : graphique de l’évolution du taux de moucheture prédit par le modèle généralisé en fonction de la quantité d’ADN de M.nivale (pg/ng)

Le 2ème modèle linéaire généralisé se base sur les essais présentant des données de flore fongique. Là encore suite aux résultats de la seconde forêt aléatoire, les variables explicatives intéressantes pour le modèle ont été choisies. De même, les interactions ayant potentiellement un effet sur le développement de la moucheture ont été choisies à l'aide d'une matrice de corrélation des variables quantitatives sélectionnées (figure 28). Pour les variables choisies ce sont celles présentant un %IncMSE supérieur ou égal à 5% qui ont été sélectionnées à savoir : le rayonnement global, la quantité d'ADN de *M.majus*, le bassin de production, sPluie>0.5 mm, la quantité d'ADN de *M.nivale,* le rendement, le taux de mitadin et la note de sensibilité à la moucheture. Les interactions qui sont testées sont celles entre Rg et sPluie>0.5 mm, Rg et *M.majus*, et entre *M.majus* et sPluie>0.5mm. Les résultats (figure 29) montrent que les effets les plus significatifs concernent la note de sensibilité variétale à la moucheture, la quantité de *M.majus* ainsi que l'interaction entre la quantité d'ADN de *M.majus* et le rayonnement global.

Comme pour le 1er modèle, le graphique du taux de moucheture prédit par le modèle, en fonction du taux observé montre une relation plutôt correcte entre les deux termes (figure 30). Si l'on s'intéresse aux illustrations graphiques des effets des variables explicatives significatives, le premier graphique (figure 31) représente la prédiction du taux de moucheture en fonction de la note de sensibilité variétale, et donc plus la note de sensibilité à la moucheture augmente et plus le taux de moucheture diminue. Pour le deuxième graphique (figure 32) c'est le taux de moucheture prédit par le modèle qui est représenté en fonction de la quantité d'ADN de M.majus, il apparaît que la présence du champignon semble favoriser l'augmentation du taux de moucheture.

Pour conclure sur ces résultats lorsque les données flores fongiques sont pris en compte dans le modèle, les effets qui semblent le plus influencer le taux de moucheture sont la sensibilité variétale, la présence de champignon et particulièrement celle de *Microdochium* ainsi que l'interaction du champignon avec son environnement ici le rayonnement global. En effet plus ce rayonnement serait important et plus l'environnement aurait tendance à être favorable au développement du champignon. Les résultats sont ici à prendre en considération car il n'était pas possible d'analyser les données de flore fongique dans la base de données en totalité, le nombre de données manquantes étant trop élevé. Cette partie de l'analyse permet néanmoins de repérer des tendances même si les conclusions ne sont pas représentatives de la base de données dans sa totalité.

## V) Conclusion & perspectives

L'étude bibliographique sur le thème de la moucheture mentionne deux grands facteurs : abiotiques et biotiques. Pour les facteurs biotiques sont cités, les conditions météorologiques à savoir la pluviométrie et la température, ainsi que l'existence d'une fenêtre de sensibilité, (période pendant laquelle le blé est sensible aux conditions favorables au développement de la moucheture). Ensuite, il y a les facteurs de type biotiques avec l'effet des champignons sur le développement de la moucheture, ainsi que de l'espèce de champignon. La sensibilité variétale à la moucheture est également souvent mentionnée.

Suites aux analyses d'une base de données regroupant 901 essais Arvalis de 1984 à 2018, on retombe sur certaines conclusions tirées de la synthèse bibliographique, et des réponses ont pu être apportées aux problématiques de ce stage à savoir :

- **Quelles sont les conditions environnementales favorables à l'apparition de la moucheture ?**

Les résultats de la forêt aléatoire et de l'analyse de variance du modèle linéaire généralisé ont montré qu'une pluviométrie importante, une faible température ainsi qu'un faible rayonnement étaient corrélés de façon positive au taux de moucheture.

- **Quelle est la part de sensibilité variétale ?**

La note de sensibilité à la moucheture apparaissait comme une variable très liée au taux de moucheture, et son effet était statistiquement plus important comparé aux autres facteurs, qu'ils soient météorologiques ou biologiques.

- **Les champignons causent-ils vraiment la moucheture ? Si oui quelles sont les espèces les plus fréquentes ?**

Suites aux analyses statistiques des essais présentant des données flore, le champignon *Microdochium.majus* est apparu comme présentant un effet significatif et favorisant le développement de la moucheture.

Il est important d'interpréter les résultats obtenus au regard de certaines conditions. En effet il aurait été intéressant de pouvoir faire le lien entre les conditions favorables au développement du champignon (température, humidité) afin de voir si au final, les conditions favorisant l'apparition de la moucheture correspondent à celles nécessaire au développement de *M.majus* par exemple. Egalement, les analyses n'ont été faites que sur une partie de la base de données et donc les variables et interactions qui n'ont pas été étudiées, auraient pu être potentiellement influentes sur la moucheture. Donc, les conclusions présentées ne sont que partielles. De plus, il n'est pas possible d'établir ici des liens de cause à effet, car les analyses n'ont seulement permis que d'étudier la significativité des effets des variables et leur relation avec la moucheture (positive ou négative). Enfin, concernant la qualité de prédiction des modèles linéaires généralisés, même si le deuxième type de modèle intégrant l'effet des champignons, se montre bon, il reste à savoir si la prédiction est toujours de qualité, avec des données différentes de celles étudiées.

Grâce aux études statistiques qui ont été faites, des grands groupes de facteurs ont pu être identifiés, ainsi que leur lien avec la moucheture. Dans le but d'affiner les résultats et les conclusions, deux types de travaux pourront être envisagés. Avec dans un premier temps l'analyse statistique du module moucheture (regroupant des données moucheture et de flore fongiques pour 10 essais, 4 bassins de production, 5 variétés, sur 3 ans) afin de consolider les résultats déjà obtenus. Puis dans un deuxième temps, grâce aux facteurs identifiés, des essais spécifiques pourraient être mis en place en conditions contrôlées. Cela permettra cette fois-ci l'identification d'éventuelles relations de cause à effet concernant la moucheture.

Comme il a été mentionné dans le contexte de ce rapport la moucheture apparaît plus comme un enjeu économique important sur la filière du blé dur. Car en effet, ce symptôme n'affecte en rien la santé humaine. Finalement, l'exigence du consommateur concernant l'esthétique du produit pousse les acteurs de la filière, à prendre en compte ce symptôme dans les critères d'exigence de qualité. Et ce, pour chacune des étapes en allant de la récolte du blé dur à la commercialisation des produits transformés. Ainsi, ne faudrait-il pas plutôt s'interroger sur les habitudes des consommateurs et plus faire un travail d'échange auprès de ces derniers à propos de la moucheture, et d'autres phénomènes similaires ?

## Bibliographie :


ARVALIS-INSTITUT DU VÉGÉTAL, 2017. *Blé dur : Guide de culture*. France : Editions ARVALIS. ISBN 978-2-8179-0353-8.

BONNOT, Titouan, 2016. *Réponse du grain de blé à la nutrition azotée et soufrée : étude intégrative des mécanismes moléculaires mis en jeu au cours du développement du grain par des analyses -omiques* [en ligne].thèse de doctorat. Clermont-Ferrand : Université Blaise Pascal. [Consulté le 13 mai 2019]. Disponible à l'adresse : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01544587

BOUSQUET, Nicolas, 2019. Du blé dur aux pâtes : une histoire très récente en France. Arvalis-infos.fr Institut du végétal [en ligne]. 24 janvier 2019. [Consulté le 13 mai 2019]. Disponible à l'adresse : https://www.arvalis-infos.fr/du-ble-dur-aux-p-tes-une-histoire-tres-recente-en-france-@/view-26765-arvarticle.html

BRAUN, Philippe, LEYGUE, Jean-Philippe, VALLADE, Sophie et DE LA PANOUSE, Geoffroy, 2012. Qualité du blé dur, le climat et la variété paramètrent le taux de moucheture. *Perspectives agricoles* [en ligne]. avril 2012. N°388. [Consulté le 5 avril 2019]. Disponible à l'adresse : https://www.perspectives-agricoles.com/view-486-arvarticlepa.html?region=

CANADIAN GRAIN COMMISSION, 2018. ISO 9001 : *Official Grain Grading Guide*.

COMITE TECHNIQUE BLE DUR OUEST OCEAN, 2014. Garantir la qualité du blé dur : quels leviers pour maîtriser la moucheture et le mitadinage. Vouillé. 6 février 2014.

DE LA PANOUSE, Geoffroy, 2011. *La moucheture du blé dur : déterminisme et méthodes d'analyse*. Rapport de stage. Toulouse : Ecole d'ingénieurs Purpan.

DESCLAUX, Dominique, 2000. Environmental conditions inducing black-point symptoms in durum wheat. *CIHEAM options méditerranéennes*. 2000. pp. 501-503.

DRAZ, Ibrahim, EL-GREMI, Shokry et ABD-ELSAMAD YOUSSEF, Wassief, 2016. Response of Egyptian wheat cultivars to kernel black point disease alongside grain yield. . 1 août 2016. Vol. 28, pp. 13-17.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2017. EN 15587 : *Cereal and cereal products - Determination of Besatz in wheat (Triticum aestivum L.), durum wheat (Triticum durum Desf.), rye (Secale cereale L.), triticale (Triticosecale Wittmack spp)and feed barley (Hordeum vulgare L.).*

FERNANDEZ, M. R., SISSONS, M., CONNER, R. L., WANG, H. et CLARKE, J. M., 2011. Influence of Biotic and Abiotic Factors on Dark Discoloration of Durum Wheat Kernels. *Crop Science*. 2011. Vol. 51, n° 3, pp. 1205. DOI 10.2135/cropsci2010.07.0433.

FERNANDEZ, M.R., CLARKE, J.M., DEPAUW, R.M., IRVINE, R.B. et KNOX, R.E., 1994. Black point and red smudge in irrigated durum wheat in southern Saskatchewan in 1990-1992. *Canadian Journal of Plant Pathology*. septembre 1994. Vol. 16, n° 3, pp. 221-227. DOI 10.1080/07060669409500757.

GRAIN TRADE AUSTRALIA, 2016. *Section 2-Wheat Trading Standards.*

GRIGNON, Guénolé, VALADE, Romain, 2017. *Analyse des déterminismes de la moucheture du blé dur*. Rapport Projet Intercéréales 2016-2017.

KHANI, Mohsen, CHEONG, Judy, MRVA, Kolumbina et MARES, Daryl, 2018. Wheat black point: Role of environment and genotype. *Journal of Cereal Science*. juillet 2018. Vol. 82, pp. 25-33. DOI 10.1016/j.jcs.2018.04.012.

LABERDESQUE, Mathieu, 2013. *La moucheture du blé dur*. GIE. 26 septembre 2013.

LIU, Jindong, HE, Zhonghu, RASHEED, Awais, WEN, Weie, YAN, Jun, ZHANG, Pingzhi, WAN, Yingxiu, ZHANG, Yong, XIE, Chaojie et XIA, Xianchun, 2017. Genome-wide association mapping of black point reaction in common wheat (Triticum aestivum L.). *BMC Plant Biology* [en ligne]. décembre 2017. Vol. 17, n° 1. [Consulté le 7 mai 2019]. DOI 10.1186/s12870-017-1167-3. Disponible à l'adresse : https://bmcplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-017-1167-3

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION, 1994. ISO 11051. *Blé dur (Triticum durum Desf.-Spécifications.*

WALLACH, Daniel, MAKOWSKI, David, JONES, James W. et BRUN, François, 2019. *Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment*. Third edition. London San Diego, CA Cambridge, MA Oxford : Academic Press an imprint of Elsevier. ISBN 978-0-12-811756-9.

UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2013. *Grain Inspection Handbook, Book II : Grain Grading procedures* [en ligne]. [Consulté le 14 mai 2019]. Disponible à l'adresse : https://www.gipsa.usda.gov/fgis/handbook/BK2/Book2.html

| | |
|---|---|
| | Diplôme et Mention : Master Biologie, Agrosciences<br>Parcours : Amélioration, Production et Valorisation du Végétal<br>Option : Fonctionnement et Gestion des Agrosystèmes (FGA)<br>Responsable d'option : Matthieu CAROF |
| Auteur(s) : CHAU Sophie<br>Date de naissance* :13/05/1995<br>Nb pages : 25 Annexe(s) :0<br>Année de soutenance : 2019 | Organisme d'accueil: Arvalis-Institut du végétal<br>Adresse : 6 chemin de la Cote Vieille, 31450 BAZIEGE<br>Maître de stage : Matthieu KILLMAYER |

Titre français : Moucheture du blé dur : identification des facteurs et gestion du risque

Titre anglais : Blackpoint in durum wheat : identification of the factors and risks management

Résumé :
La moucheture du blé dur provoque une coloration foncée du grain impactant la qualité visuelle des produits qui en découlent, et leur commercialisation. La moucheture a toujours fait l'objet de recherches sans que les causes soient clairement définies, selon les situations. L'objectif de l'étude est de pouvoir identifier les facteurs potentiels favorisant la moucheture. D'abord, il s'agissait de tester la qualité prédictive d'un modèle moucheture crée en 2013, sur des années non testées (2013 à 2018). La prédiction n'étant pas bonne, d'autres facteurs non pris en compte dans le modèle seraient à considérer. Une autre démarche d'analyse statistique a été faite pour tester la significativité de l'effet des facteurs potentiels de la moucheture, en intégrant de nouvelles variables (flores fongiques, efficacité des fongicides). Les résultats de l'analyse de la base de données (901 essais de 1984 à 2018), montrent qu'une pluviométrie importante, une faible température et un faible rayonnement global favoriserait le symptôme. Néanmoins c'est la part de sensibilité variétale à la moucheture qui devance les autres facteurs. Enfin, côté flore fongique, *M.majus* est le champignon qui présente un effet significatif et favoriserait la moucheture, par rapport aux autres espèces (*F.graminearum* & *M.majus*). Les résultats à l'issus de ce stage se montrent en accord avec ce qu'il y a dans la bibliographie. Mais une analyse plus poussée d'essais en conditions contrôlées permettraient de valider les résultats obtenus, en établissant des relations de cause à effet.

Abstract :
Blackpoint of the durum wheat cause a grain discoloration that has consequences on the quality of the appearance of the derivative wheat products, and their marketing. Even if blackpoint have always been the aim of many researches, causes have not been distinctly attributed to one specific condition. The goal of the current study is the identification of potential factors which could favor blackpoint. First the quality of the prediction of a blackpoint statistical modelling designed in 2013, have been tested on non-tested years (2013 to 2018). The prediction of the blackpoint model is not reliable this would mean that other factors that have not been integrate in the model have to be considered. Thus an additional approach of statistical analysis has been done to test if the effects of potential factors of blackpoint are significant or not. Results revealed that environmental conditions which promote blackpoint are high rainfall, low temperature and solar radiation. However the varietal sensitivity has more effect compared to the other factors. As regards to the results about fungi *M.majus* appears to be a significant factor in favor of the blackpoint development compared to the others (*F.graminearum* & *M.majus*). Conclusions of this study are in agreement with literature. Nevertheless a more accurate study on experiment with targeted treatment could confirm the obtained results with causal links.

Mots-clés : moucheture –blé dur-coloration du grain–qualité –base de données-analyse statistique

Key Words: blackpoint –durum wheat-grain discoloration-quality-database-statistical analysis

* *Elément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires*