



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi- B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques



Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie.

Filière : Sciences Biologiques.

Spécialité : Microbiologie appliquée.

Intitulé :

Les mycotoxines de *Fusarium* dans les céréales et
les aliments dérivées : synthèse bibliographique.

Présenté Par :

M^{elle} RACHEDI Meriem & M^{elle} KHINOUCHE Loubna.

Soutenu le : 19/09/2022, Devant le Jury :

Président :	Mme SOUAGUI Yasmine	MCB Université de B.B.A.
Encadrant :	Mme. ABED Hanane	MAA Université de B.B.A.
Examineur :	Mme IRATNI Nadjet	MAA Université de B.B.A.

Année universitaire : 2021 / 2022



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents,

Pour leur amour, leur encouragement, leur patience et leur conseil

A mes chers frères.

A Mes grands-parents : Said et Omar

Mes grand-mères : Yamina et Baya

Pour leur soutien tout au long de ma vie estudiantine.

Mes chers amis : Zahra, Bouchra, Ikram et Chaima

A tous mes collègues de la promotion « Microbiologie »

A toute ma famille « RACHEDI » et ma belle-famille « HAMADOUCHE ».

Et aussi mon binôme Loubna et sa famille « KHINOUCHE ».

Rachedi Meriem





Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

*A mes très chers parents , pour leur amour et pour leur soutien et leurs encouragements pour moi tout au long des étapes estudiantine .
À mon très cher père Abdelkarim Khinouche , je le remercie infiniment, et à*

mon bijou ma mère Hakima Bellameche .

*À mes chers frères et mes sœurs elles m'ont toujours aidée dans mes moments
d'échec et de faiblesse Djamilia et Asma .*

*À mes proches : Bochra ; Hasna ; aicha ; meriem et tous mes amis.
À tous les membres de la famille Khinouche et Mon mari Bellameche Akram*

À Tous ceux qui me sont chers.

KHINOUCHE LOUBNA





Remerciement

*Tout d'abord, louange à « **ALLAH** » Tout- puissant, qui était avec nous tout au long de nos vies et nous a inspiré les bons pas et les justes réflexes, et qui nous a guidé dans notre étude et nous a donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.*

*Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont à madame **ABED Hanane** pour ses conseils, ses encouragements, sa patience sa compétence et sa gentillesse qui nous ont permis de bien mener ce travail. Le suivi et l'orientation dont nous avons pu bénéficier.*

*Nous tenons à exprimer notre très grande considération a madame **SOUAGUI Yasmina** Docteur à UNV de Bordj Bou Arreridj et madame **IRATNI Nadjet** Enseignante à UNV de Bordj Bou Arreridj d'avoir accepté de juger ce travail.*

Table des matières

Table des matières

Liste des tableaux
Liste des figures
Liste d'abréviation
Résumé
Introduction.....1
Chapitre I : Les céréales
I.1.Définition3
I.2. Place des céréales dans le monde.....3
I.3. Place des céréales en Algérie.....3
I.4. Principales céréales utilisées en Algérie4
I.4.1. L'orge4
I.4.2. Blé.....4
I.4.3. L'avoine4
I.4.4. Maïs4
I.5. Principales maladies des céréales.....5
I.5.1. Rouille noire.....5
I.5.2. Septoriose5
I.5.3. Charbon nu6
I.5.4. Fusariose.....6
Chapitre II : Le genre *Fusarium* et les mycotoxines fusariennes
II.1. Genre *Fusarium*.....7
II.1.1. Taxonomie7
II.1.2. Morphologie et caractéristiques physiologiques.....7
II.1.3. Contamination des céréales et leurs dérivés par les mycotoxines fusariennes8
II.2.Les mycotoxines fusariennes.....9
II.2.1. Définition.....9
II.3 Conditions de production des mycotoxines9
II.3.1. Facteurs extrinsèques..... 10

II .3.2 Facteurs intrinsèques.....	11
II.4. Types des mycotoxines fusariennes.....	11
II.4.1. Trichothécènes	12
II.4.1.1 Structure	12
II.4.1.2. Propriétés physico-chimiques de trichothécènes.....	13
II.4.1.3. Biosynthèses des trichothécènes	14
II.4.1.4. Mode d'action de trichothécènes	14
II.4.1.5. Toxicologie.....	14
II.4.2. Zéaralénone	14
II.4.2.1. Structure.....	15
II.4.2.2. Propriétés physico-chimiques de zéaralénone.....	15
II.4.2.3. Biosynthèse de la zéaralénone	15
II.4.2.4. Mode d'action de zéaralénone	16
II.4.2.5. Toxicologie	16
II.4.3. Fumonisines	16
II.4.3.1. Structure.....	17
II.4.3.2. Propriétés physico-chimiques fumonisines	17
II.4.3.3. Biosynthèse de fumonisines.....	18
II.4.3.4. Mode d'action des fumonisines	18
II.4.3.5. Toxicologie	19
Chapitre III : Méthodes de diagnostique	
III. Méthodes de diagnostique	20
III.1. Extraction liquide - liquide	20
III.2. Extraction en phase solide.....	21
III.3. Chromatographie sur couche mince	21
III.4. Chromatographie liquide haute pression	21
III.5. Chromatographie en phase gazeuse (CPG)	22
III.6. La chromatographie gazeuse couplée à un détecteur.....	22
III.7. Chromatographie liquide couplée à la spectrographie de masse (CL / SM)	23
III.8. Techniques rapides	23
III.8.1. Kits de dosage.....	23

III.8.2. MALDI.....	24
III.9. Méthode génétique.....	24
Chapitre IV : les moyens de lutte contre les mycotoxines	
IV. Les différentes stratégies de lutte contre les mycotoxines.....	25
IV.1. Les stratégies préventives des contaminations.....	25
VI.2. Stratégies de contrôle précédant la récolte	26
VI.3. Stratégies de contrôle pendant la récolte.....	26
VI.4. Stratégies de contrôle après la récolte.....	26
IV.5. Les méthodes chimiques.....	27
VI.5.1. Dénaturation chimique	27
VI.6. Méthodes biologiques.....	28
VI.7. Méthodes physiques.....	29
VI.7.1. Elimination des fractions altérée	30
VI.7.2. Traitements thermique.....	30
VI.7.3. Irradiations.....	30
IV.8. Adsorption des toxines.....	31
VI.9. limite de lutte des mycotoxines.....	31
Conclusion.....	33
Références bibliographiques.....	34

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I : La nouvelle classification taxonomique de *Fusarium*.....07

Tableau II : Mycotoxines fusariennes détectées dans des lots de grains des céréales.....09

Tableau III : Principaux facteurs influençant la production des mycotoxines dans la chaîne alimentaire..... 11

Tableau VI : Principaux espèces fusariennes et mycotoxines associées.....12

Tableau V : Classification des trichothécènes.....13

Tableaux IV : Efficacité comparée des méthodes chimiques de décontamination.....27

Tableau IIV : Capacité des glucomannanes de *Saccharomyces cerevisiae* à lier les mycotoxines.....29

Liste des figures

Liste des figures

Figure 01 : Production céréalière, utilisation et stocks (2011-2021).....	03
Figure 02 : La rouille noire.....	05
Figure 03 : Les symptômes de septoriose.....	06
Figure 04 : Les symptômes de charbon nu.....	06
Figure 05 : Les symptômes de Fusariose.....	06
Figure 06 : Aspects morphologiques d'espèces de <i>Fusarium</i>	08
Figure 07 : Les paramètres responsables de la mycotoxinogénèse.....	10
Figure 08 : Structure générale semi développée des trichothécènes.....	15
Figure 09 : Structure de la zéaralénone.....	17
Figure 10 : Structures chimiques des fumonisines.....	19
Figure 11 : Action de la FB1 sur le métabolisme des sphingolipides.....	19
Figure 12 : Principes d'analyse des mycotoxines.....	20
Figure 13 : Structure des mycotoxines et sensibilité aux traitements chimiques exemple de la fumonisine B1.....	28

Liste des abréviations

ADN	Acide Désoxyribonucléique.
ASE	Accelerated Solvent Extraction
Aw	Activité of water.
BHA	L'hydroxy Anisole Butylé
BHT	L'hydroxy Toluène Butylé
C	Carbon
°C	Degré Celsius.
CCM	Chromatographie Sur Couche Mince
CL / SM	Chromatographie Liquide couplée à la Spectromètre de Masse
CLHP	Chromatographie Liquide Haute Performance
CPG	Chromatographie En Phase Gazeuse
DAS	Diacétoxyscirpénol
DON	Déoxynivalénol
ECD	Électron Capture Detector
F	<i>Fusarium</i>
FAO	Food and Agriculture Organisation.
FB	Fumonisine B
FID	Flamme Ionization Detector
HACCP	Hazard Analysis and Control Critical Point
HFB	Hepta Fluoro Butyryl
IARC	Agence International pour la Recherché contre le Cancer.
LH	Luteinizing Hormone
MAE	Extraction Assistée Par Micro - Ondes
MS	Spectrométrie de Masse
NADH	Nicotinamide Adenine Dinucleotide

NADPH	Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate
NIV	Nivalénol
PFP	Fluoropropionyl
pH	Power Of Hydrogen
PLE	Extraction Par Liquide Pressurisée
PP	Parabène de Propyle
RAL	Resorcylic Acid Lacton
SAU	Surface Agricole Utile
SFE	Extraction Par Fluide Super Critique
TCT	Trichothécènes
TFA	Trifluoroacétyl
TMS	Triméthylsilyl
UV	Ultra-Violet
ZEN	Zéaralénone

Résumés

Résumé

Les céréales sont une source importante de nutrition humaine et animale. À échelle national et mondial, elles sont au cœur du système agricole. Néanmoins, il y a un problème de la contamination permanente par des champignons pathogènes, de sa croissance, son transport, son stockage jusqu'à au consommateur. Il s'agit notamment de *Fusarium*, qui affecte les rendements des cultures en raison de la présence de toxines dans les céréales qui à son tour affecte la santé des consommateurs. L'objectif de cette contribution est de mettre en exergue sur le diagnostic précis de ces toxines en développant des techniques de détection précoce et rapide et ainsi les méthodes de lutte. Le zéaralénone (ZEA), trichothécène (TCT) et La fuminosine (FB) sont des toxines les plus importantes excrétées par les souches fongiques de *Fusarium*, ces toxines fonctionnent de divers degrés dangereux et causant de nombreuses maladies. Le contrôle de ces toxines comprend une stratégie globale visant à réduire leur efficacité et leur prévalence, les méthodes de contrôle peuvent être chimiques, génétiques, ou biologiques. Finalement la méthode physique reste la plus efficace.

Mots-clés : céréales, *Fusarium*, mycotoxines, trichothécènes, zéaralénone fuminosine.

ملخص

تعتبر الحبوب مصدر رئيسي لتغذية الإنسان والحيوان على الصعيدين المحلي والعالمي، لذلك تحتل مكانة مركزية في النظام الزراعي. إلا أنها تواجه مشكلة تعرضها المستمر للفطريات الممرضة، بداية من نموها، نقلها، تخزينها الى غاية وصولها الى المستهلك. ومن بين هذه الفطريات *Fusarium* الذي يؤثر على المردود وصحة المحصول بسبب وجود السموم في الحبوب والتي بدورها تؤثر على صحة المستهلك. الهدف من هذه المساهمة هو تسليط الضوء على التشخيص الدقيق لهذه السموم عن طريق تطوير تقنيات الكشف المبكر والسريع وطرق مكافحتها. تعتبر مجموعة السموم (ZEA) *Zéaralénone*، *Trichothécène* (TCT) بالإضافة إلى *Fuminosine* (FB) من أهم السموم التي تفرزها سلالات الفزاريوم، تعمل هذه السموم بدرجات متفاوتة الخطورة مسببة العديد من الأمراض. تتضمن السيطرة على هذه السموم استراتيجية شاملة تهدف الى تقليل مفعولها والحد من انتشارها، ويمكن أن تكون طرق المكافحة كيميائية، وراثية، او بيولوجية. وفي الأخير تبقى الطرق الفزيائية هي الاكثر فعالية.

الكلمات المفتاحية: الحبوب، *Fusarium*، السموم الفطرية، *trichothécènes*، *zéaralénone*

.*fuminosine*

Introduction

Introduction

Depuis que l'homme s'est sédentarisé et intéressé à l'élevage et à l'agriculture, le nombre de pathologies liées à l'alimentation s'est multiplié.

Les premières épidémies de mycotoxicoses ont été décrites durant l'Antiquité et s'apparentaient à l'ergotisme, plus tard nommé « Feu de Saint Antoine » ou « Mal des Ardents ». Il était à l'origine d'épidémies importantes qui sévissaient à travers le Vieux Continent au cours du Moyen Âge, faisant des centaines de milliers de victimes. Il était appelé ainsi à cause de la sensation de brûlure qu'éprouvaient les victimes. La maladie pouvait aussi être à l'origine de gangrène des extrémités, d'hallucinations et de convulsions pouvant entraîner la mort. La maladie était provoquée par la consommation de farine de seigle contaminée par des mycètes du genre *Claviceps*. Il aura fallu attendre le XIX^{ème} siècle pour que des savants réussissent à isoler les alcaloïdes responsables de l'ergotisme et à en étudier les caractéristiques toxicologiques. **(Gauthier, 2016).**

De nos jours, les mycotoxines sont présentes dans tout un ensemble de produits alimentaires. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) estime qu'environ un quart de la production mondiale est contaminé, représentant ainsi une perte économique de 5 à 10 %. Outre l'impact économique, les mycotoxines posent un réel problème de santé publique. Leur contact peut donner lieu à des intoxications aiguës ou chroniques, ces dernières étant plus fréquentes. Cancérogénèse, immunotoxicité, néphrotoxicité, hépatotoxicité et neurotoxicité forment la palette des effets néfastes des toxines fongiques. **(Rkiba, 2020).**

La gestion du risque passe donc par la prévention de la contamination des matières premières, le respect des bonnes pratiques de culture et de stockage, ainsi que la mise en place d'une réglementation fixant des concentrations maximales admissibles dans les denrées alimentaires. **(Aloui, 2018).**

Ce travail bibliographique a pour but de décrire et d'étudier les mycotoxines fusariennes sur les céréales présentant les effets les plus délétères ainsi que leur impact sur la santé humaine.

Ce document traite les mycotoxines fusariennes, de leurs propriétés physico-chimiques, toxicologiques, les Principaux facteurs influençant la production des mycotoxines dans la chaîne alimentaire, le diagnostic précis de ces toxines et les différentes stratégies de lutte contre les mycotoxines

Chapitre I

Les céréales

Chapitre I : Les céréales

I.1. Définition

Les céréales sont des espèces généralement cultivées pour leur grain, dont l'album en amylacé, réduit en farine, est consommable par l'homme ou par les animaux domestiques. La plupart des céréales appartiennent à la famille des graminées (ou poacées). Ce sont : le blé, l'orge, l'avoine, le seigle, le maïs, le riz, le millet, le sorgho. Les unes appartiennent à la sous-famille des festucoïdées : blé, orge, avoine, seigle ; les autres à la sous-famille des panicoidées : maïs, riz, sorgho, millet. Le sarrasin appartient à une autre famille, celle des poly-gonacées (Moule, 1971).

I.2. Place des céréales dans le monde

La culture des céréales représente un secteur économique important, la situation de la céréaliculture est liée à l'évolution des superficies, des productions et par conséquent des rendements obtenus (FAO, 2020).

Les marchés mondiaux des céréales s'orientent vers une production record en 2021-2022 mais les stocks ne devraient progresser que légèrement. Les dernières prévisions de la FAO concernant les échanges mondiaux de céréales en 2021-2022 ont été légèrement relevés depuis juin et s'établissent à présent au niveau record de 472 millions de tonnes, soit une hausse de 0,8 pour cent par rapport au volume de 2020-2021 (FAO, 2021).



Figure 01 : Production céréalière, utilisation et stocks (2011-2021) (Bulletin FAO, 2021).

I.3. Place des céréales en Algérie:

Les céréales et leur dérivées constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien, la production céréalière algérienne a reculé en 2015-2016. Selon les chiffres cités par le Ministère de l'Agriculture, la production nationale de céréales (orge, blé tendre et dur) a chuté à 3.3 millions de Quintaux durant la dernière saison. Elle était de 4 millions de

Quintaux en 2014-2015, de 3.5 millions de Quintaux en 2013-2014 et de 4.91 millions de tonnes en 2012-2013 (FAO 2016).

I.4. principales céréales utilisées en Algérie

Les céréales constituent la composante principale des productions végétales en Algérie, elles couvrent près de 80% de la surface agricole utile (SAU). La superficie céréalière nationale est actuellement d'environ 3,7 millions d'hectares (Madr, 2005).

I.4.1. L'orge (*Hordeum vulgare*)

L'orge est une monocotylédone de la famille des Graminées (Poacées), l'espèce la plus cultivée est : *Hordeum vulgare*. Il est une plante annuelle au cycle végétatif court 130 à 150 jours. La graine et le foin d'orge sont utilisés pour l'alimentation animale, sert à l'engraissement du bétail quant à la paille, elle lui sert de litière (Soltner 2005).

I.4.2. Le blé

Le blé (*Triticum durum*) est la céréale la plus cultivée, il compte actuellement quelques 30000 formes cultivées. Il regroupe essentiellement le blé tendre (*Triticum aestivum L. subsp. aestivum*) qui destiné à l'industrie de la meunerie et permet d'obtenir une farine de bonne qualité et le blé dur (*Triticum durum Desf*), est la première céréale cultivée dans le pays (Lesage, 2011).

I.4.3. L'avoine (*Avena sativa*)

L'avoine est une céréale d'hiver, sa culture en Algérie est moins importante que celle des deux précédentes céréales. L'avoine est une graminée (famille des *Poaceae*) annuelle, adaptée à de nombreux types de sols, utilisée dans l'alimentation humaine sous forme de flocons et pour la fabrication de certains alcools (Husson *et al*, 2012).

I.4.4. Le maïs (*Zea mays*)

Le maïs est une plante herbacée annuelle monoïque dicline de taille variable (de 40 cm jusqu'à 6 m, généralement entre 1 et 3 m pour les variétés couramment cultivées). (Mialoundama, 2020).

Le maïs a trois grands type d'utilisations : l'alimentation animale qui est de loin le premier débouché (environ les deux tiers globalement) et concerne surtout les pays industrialisés, l'alimentation humaine, particulièrement importante dans certains pays du Tiers monde, notamment l'Afrique subsaharienne et l'Amérique latine, et marginale dans les pays industrialisés, et enfin les industries agroalimentaires, y compris pour la production d'alcool

comme biocarburants, biogaz ou bioplastiques. 1 500 utilisations du maïs ont été répertoriées. (Semassa *et al.*,2016).

I.5. Principales maladies des céréales

Les céréales sont sensibles aux nombreuses maladies qui diminuent fortement les rendements et la qualité du grain. C'est par les semences que se transmettent la plupart de ses maladies dont les germes se trouvent soit à la surface du grain soit à l'intérieur du grain (Anonyme, 2006).

I.5.1. Rouille noir (*Puccinia graminis*)

C'est la rouille qui apparaît tardivement, généralement au stade grain laiteux pâteux, elle se développe sur les feuilles, les tiges et même les épis en formant des pustules de couleur rouge-brique à marron foncé. Ces pustules sont de taille plus grande que celles des rouilles bruns et jaunes, elles peuvent se rejoindre et causer des déchirures de l'épiderme (Anonyme, 2006).



Figure 02 : La rouille noire (Web 1).

I.5.2. Septoriose

Plusieurs septoriose peuvent attaquer les céréales. Les principales sont dues à *Septoria nodorum* et sont transmises par la semence. À la levée, le champignon provoque des taches ovales sur la coléoptile. On distingue parfois sur le caryopse des points noirs qui sont les pycnides, organe de multiplication du champignon (Anonyme, 2006).



Figure 03 : Les symptômes de septoriose (Web 2).

I.5.3. Charbon nu (*Ustilago tritici*)

C'est l'une des maladies les plus faciles à diagnostiquer. Elle affecte uniquement l'épi, l'épiaison des plantes infestées est plus précoce que celle des plantes saines. Les épis sont nus et les graines sont remplacées par une poudre noire. Seul le rachis reste intact. L'épi fait place à une masse pulvérulente noire (spores) facilement dispersée par le vent, souvent même, il est réduit à un axe noirâtre. La contamination se produit à la floraison (Anonyme, 2006).



Figure 04 : Les symptômes de charbon nu (Web 3).

I.5.4. Fusariose (*Fusarium avenaceum*)

Les fusarioses sont parmi les maladies les plus dangereuses sur le blé, elles font baisser le rendement par diminution de la faculté germinative des semences, du nombre de grains par épi et du poids de mille grains. La présence des diverses espèces de *Fusarium* spp. sur les grains peut réduire leurs qualités boulangères (Cahagnier, 2001 ; Gutzwiller et al., 2005).

Parmi les fusarioses des céréales, la fusariose de l'épi et les pourritures du pied sont les plus fréquentes en Algérie. Les épillets commencent à se décoller et finissent par donner des épis de couleur blanchâtre, les bases des tiges deviennent entourées de lésions brun foncé, les grains sont échaudés et décolorés (Anonyme, 2006).



Figure 05 : Les symptômes de Fusariose (Web 4).

Chapitre II
Genre Fusarium et
Mycotoxines fusariennes

II.1. Genre *Fusarium*

Les *Fusarium* sont des champignons filamenteux dont le genre « Deutéromycète » a été décrit pour la première fois en 1809 par Link, directeur du Jardin Botanique de Berlin, sous le nom de *Fusisporium*. Ce genre regroupe de nombreuses espèces. Leur nom, *Fusarium*, fait référence à leurs spores en forme de fuseau (latin : *Fusus*), également décrites comme ayant une forme de canoë ou de banane (**figure 06**). Dès 1821, Fries, botaniste suédois, décrit le genre *Gibberella*, correspondant à la forme sexuée (téléomorphe) de la majorité des espèces de *Fusarium* (**Heit, 2015**).

II.1.1. Taxonomie

Les *Fusarium* sont classifiés de deux façons selon leur forme sexuée ou non (**Heit, 2015**).

- Anamorphe lorsque la forme asexuée est connue, appelée aussi forme imparfaite *Fusarium*.
- Téléomorphe lorsque la forme sexuée est connue, appelée également forme parfaite : *Gibberella* ou *Nectria*. La nouvelle classification taxonomique basée sur la phylogénie moléculaire selon **Debourgogne (2013)** est la suivante :

Tableau I : La nouvelle classification taxonomique de *Fusarium* (**Debourgogne, 2013**).

Règne	<i>Fungi</i>
Division	<i>Ascomycota</i>
Classe	<i>Sordariomycetes</i>
Sous-classe	<i>Hypocreomycetidae</i>
Ordre	<i>Hypocreales</i>
Famille	<i>Nectriaceae</i>
Genre	<i>Fusarium</i>

II.1.2. Morphologie et caractéristiques physiologiques

La principale caractéristique morphologique des *Fusarium* est la présence de macroconidies en forme fusiformes, cloisonnées (**figure 06**). Le thalle des *Fusarium* est à croissance, habituellement, rapide et de couleur variée (**Jeunot,2005**), les conidiophores parfois très ramifiés formant sur le thalle des coussinets (sporodochies) et portent des masses de spores d'aspects gras, les phialides sont plus ou moins allongées et peuvent produire deux types de conidies: des macroconidies fusiformes, avec une cellule basale pédicellée, portant une sorte de talon et/ou des microconidies petites, généralement septées, piriformes, fusiformes ou ovoïdes. Les chlamydospores peuvent être présentes comme absentes, se différenciant soit par le mycélium ou par les conidies (**Botton et al., 1990 ; Jeunot, 2005**).

Au niveau de physiologie cellulaire, les *Fusarium* ont une croissance optimale à une température comprise entre 22 et 37 °C. La majorité des moisissures se développent bien dans un milieu humide ($A_w = 0,85$), les *Fusarium* se développent dans un milieu très humide ($A_w > 0,9$), ce qui explique leur présence dans les champs et sur les plantes vivantes (Castegnaro et Pfohl-Leszkowicz, 2002). Ces moisissures sont aérobies, l'oxygène leur permet d'effectuer une croissance normale. Cependant, la plupart peuvent se développer même si l'oxygène est limité. Ils se développent normalement à un pH compris entre 3 et 8 (Adjou *et al.*, 2013).

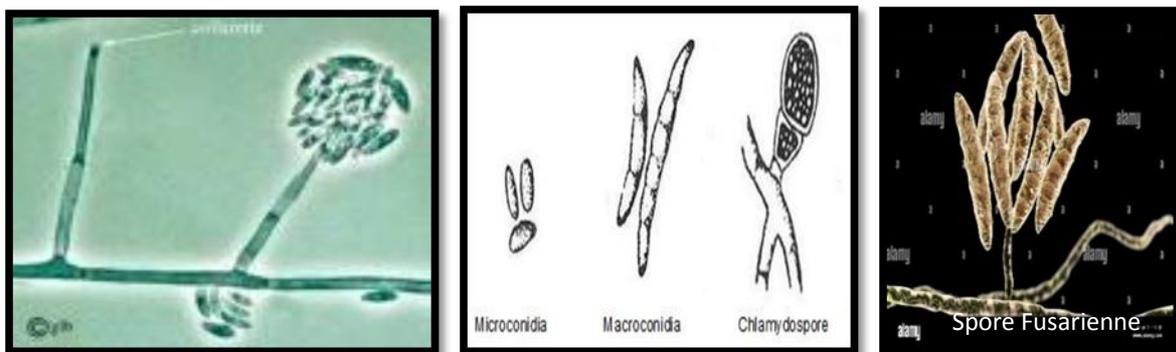


Figure 06 : Aspects morphologiques d'espèces de *Fusarium* (Web 5).

II.1.3. Contamination des céréales et leurs dérivés par les mycotoxines fusarienne

Les céréales sont probablement la source la plus importante d'apport en mycotoxines. ont indiqué qu'environ 25% des céréales consommées dans le monde sont contaminées par les mycotoxines (Lahouar, 2016).

Les chercheurs scientifiques signalé la présence de zéaralénone dans le maïs, dans d'autres céréales et dans des ensilages dans plusieurs régions du monde. Ils ont également rapporté que du soya abîmé par des intempéries a été contaminé par la ZEN. La ZEN se retrouve aussi dans le blé, l'orge, l'avoine, le sorgho, les graines de sésame, lefoin et les ensilages. Le DON se retrouve dans des grains partout dans le monde et peut se propager dans les céréales entreposées lorsque la teneur en humidité des grains se situe aux environs de 22 à 25 %. Les fumonisines B1, B2 et B3 se forment dans les cultures fongiques; on les trouve également dans des échantillons de maïs contaminés naturellement (Whitlow et Hagler, 2001).

Comme le montre le **tableau II**, les niveaux de contamination en déoxynivalénol peuvent être très largement supérieurs à ces seuils. La fréquence de la présence des différentes mycotoxines fusariennes et les niveaux de contamination que l'on peut rencontrer **tableau II** implique que le respect des recommandations définies est un défi important (Champeil, 2004).

Tableau II : Mycotoxines fusariennes détectées dans des lots de grains des céréales (Champeil ,2005).

Toxine	Fréquence de détection		Gamma des teneurs, observées	
	Monde	Europe	Monde	Europe
Déoxynivalénol	47%	60%	1 – 67000	4 – 67000
Nivalénol	40%	16%	2 – 37900	3 - 7800
Toxine T2	8%	12%	1– 38890	1- 14000
Zéaralénone	13%	15%	2– 275800	1 -175000
Fumonisine B1	73%	86%	1 - 117520	50 – 4670

II.2. Les mycotoxines fusariennes

II.2.1. définition

Le terme mycotoxine vient du grec «mycos» qui signifie champignon et du latin «toxicum» qui signifie poison. Il désigne des métabolites secondaires élaborés par des champignons filamenteux microscopiques ou moisissures vers la fin de la phase exponentielle de leur croissance et n'ont aucune signification biochimique ni pour la croissance et le développement fongique ni pour la compétition. Les principaux champignons toxigènes producteurs de mycotoxines appartiennent principalement aux genres *Claviceps*, *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus* et *Fusarium* (Hussein & Brasel, 2001).

II.2.2. Conditions de production des mycotoxines

Les mycotoxines peuvent être produites à tous les stades de la chaîne alimentaire depuis le champ jusqu'au produit fini. La sécrétion des métabolites toxiques par les moisissures dans les aliments dépend de plusieurs facteurs qui peuvent être intrinsèques (lié à la souche fongique) ou / et extrinsèques (conditions de l'environnement) (figure 07) (Guezlane *et al.*, 2016).

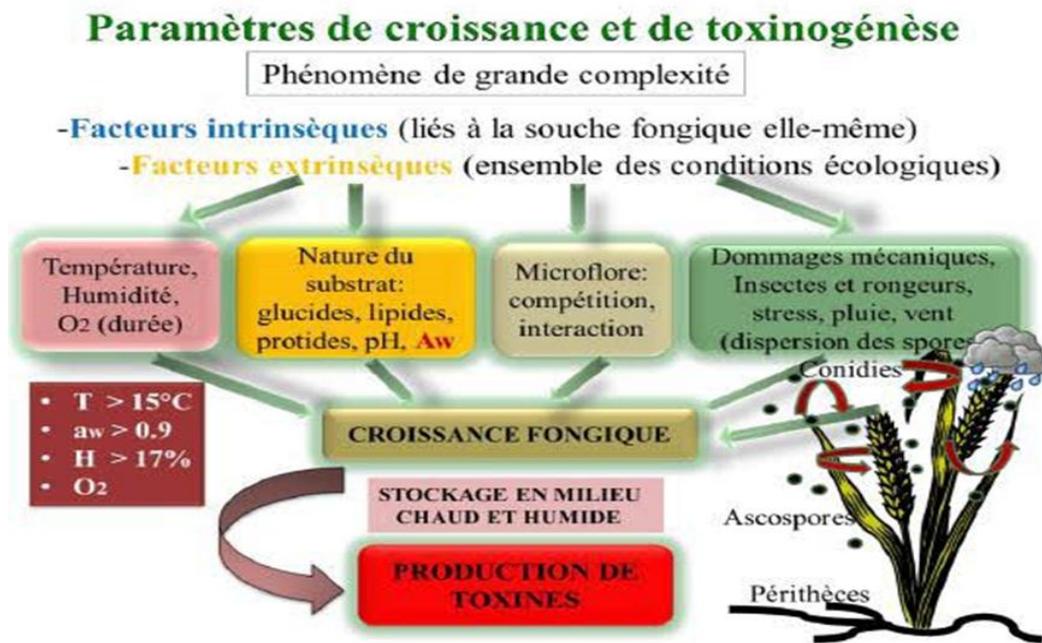


Figure 07 : Les paramètres responsables de la mycotoxinogénèse (Guezlane et al., 2016).

II.2.2.1. Facteurs extrinsèques

La production de mycotoxines par les moisissures est fortement dépendante des conditions climatiques, notamment de la température et de l'humidité (rapportée à l'activité en eau), mais aussi des nutriments présents. En effet, diverses conditions doivent être réunies pour entraîner la production de fusariotoxines : le climat, la nature du substrat, le conditionnement des produits, l'utilisation de produits fongicides, les facteurs environnementaux (Tableaux III) (Boevre et al. 2012).

La température optimale moyenne de production est comprise entre 20 et 30°C. L'humidité du sol influence également la production et la présence de mycotoxines. Il est estimé que la production est favorisée par une humidité élevée ($a_w > 0,93$). L'impact de la composition gazeuse des sols est également important. Une diminution de la concentration en O₂ entraîne une diminution de la production de mycotoxines et une augmentation de la concentration en CO₂ a un effet dépressif sur la culture (Siou, 2013).

Les prédateurs tels que les acariens, les insectes ou les oiseaux, sont des vecteurs de spores qui provoquent la dissémination des moisissures et qui permet une prolifération plus aisée et une production de mycotoxines (Tableau III) (Heit, 2015).

Tableau III : Principaux facteurs influençant la production des mycotoxines dans la chaîne alimentaire (Atoui, 2006).

Facteurs	Physiques	biologiques	chimiques
	Humidité.	- Stress de plante.	CO ₂
	Rapidité de séchage.	- Vecteurs invertébrés.	O ₂
	Ré humidification.	- Différences entre les	-Nature
	Humidité relative.	variétés des plantes.	du substrat.
	Température.	- Différences entre les	-Nutrition
	Damage mécanique.	souches fongiques.	minérale.
	Mélange de grains.	- Charge en spores.	-Traitement
	Temps.	- Système microbiologique.	chimique.

II .2.2.2. Facteurs intrinsèques

Les facteurs biologiques peuvent être liés à l'espèce fongique, à la spécificité de la souche et à l'instabilité des propriétés toxiques (**Tableau III**). Une même toxine peut être élaborée par différentes espèces quelque fois appartenant à différents genres et une même espèce peut produire plusieurs mycotoxines. De plus, la présence de plusieurs espèces fongiques sur la même denrée a généralement un effet dépressif sur la production de toxine. Cela s'explique d'une part, par la compétition pour le substrat et d'autre part, par le fait que certaines souches peuvent dégrader la toxine (**Le Bars *et al.*, 1987**).

II.3. Types des mycotoxines fusariennes

Les espèces fusariennes produisent les mycotoxines à plusieurs familles de molécules les trichothécènes, les fumonisines et la zéaralénone (ZEA)... (**Tableau VI**) Il existe D'autres fusariotoxines sont également identifiées, comme par exemple la moniliformine ; les enniatines, la beauvericine et la fusarine C. Ces dernières toxines sont couramment qualifiées «d'émergentes » (**Charmet *et al.*, 2016**).

Tableau IV : Principales espèces de *Fusarium* et mycotoxines associées (Yiannikouris et al., 2002).

Espèces	Mycotoxines
<i>Fusarium sporotrichioides</i> ; <i>F. graminearum</i> ; <i>F. culmorum</i> ; <i>F. poae</i> ; <i>F. roseum</i> ; <i>F. tricinctum</i> <i>F. acuminatum</i>	Trichothécènes (déoxynivalénol)
<i>Fusarium moniliforme</i> ; <i>F. proliferatum</i>	Fumonisines B1, B2, B3
<i>Fusarium graminearum</i> ; <i>F. culmorum</i> ; <i>F. crookwellense</i>	Zéaralénone
<i>F. moniliforme</i> ; <i>F. crookwellense</i> ; <i>F. subglutinans</i> <i>F. sambucinum</i> ; <i>F. napiforme</i> ; <i>F. heterosporum</i> <i>F. oxysporum</i> ; <i>F. solani</i> ; <i>F. proliferatum</i>	Acide fusarique

II.3.1. Les trichothécènes

Les trichothécènes sont des mycotoxines produites par de nombreux *Fusarium* dont les principaux sont *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum*, *Fusarium poae* et *Fusarium sporotrichioides*. Dans l'alimentation, les plus fréquemment retrouvés sont le nivalénol (NIV), le déoxynivalénol (DON), les toxines T2 et HT2 et le diacétoxyscirpénol (DAS). Plus de 190 molécules ont été identifiées comme appartenant à ce groupe de mycotoxines. Ces toxines sont les plus fortement associées avec des toxicoses chroniques et fatales chez l'homme, ainsi que chez l'animal (Heit, 2015).

II.3.1.1. Structure

Les trichothécènes (TCT) sont classés en quatre groupes, les types A, B, C et D (Tableau 05). Ce sont des métabolites secondaires de nature sesquiterpénique. Ils partagent tous le même squelette tricyclique de 15 carbones avec une double liaison entre le carbone 9 et 10 et une fonction époxyde entre le carbone 12 et 13 qui joue un rôle majeur dans leur toxicité et diffèrent par la présence de motifs d'oxygénation, d'acétylation ou d'acylation de ce squelette. (Jean, 2014).

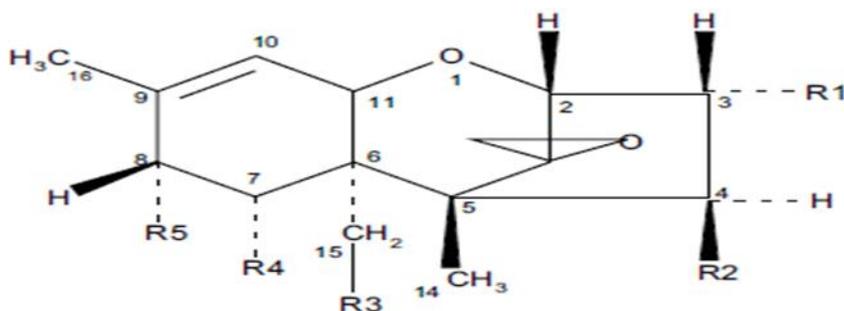


Figure 08 : structure générale semi développée des trichothécènes (Alexandre, 2003).

Tableau V : Classification des trichothécènes (Heit ,2015).

Groupe	Caractéristiques	Exemples de mycotoxines
A	Trichothécènes n'ayant pas de fonction cétone en position C8 (ex. hydroxyle ou ester)	T2, HT2, DAS
B	Fonctionnalité cétone/groupement Carbonyl en position C8	DON (et ses dérivés), NIV, fusarénoneX
C	Second cycle époxyde entre C7 et C8 ou entre C8 et C9	Crotocin, baccarin
D	Anneau macrocyclique (pont de molécules de mévalonate substitué) entre C4 et C15	Satratoxines, Roridines

II.3.1.2. Propriétés physico-chimiques de trichothécènes

Les trichothécènes sont des molécules non volatiles. Elles sont insolubles dans l'eau mais hautement solubles dans l'acétone, l'acétonitrile, l'éthanol, le méthanol... Ces molécules sont stables à la lumière, aux UV, ainsi qu'à des pH neutres et acides, ce qui implique l'absence d'hydrolyse dans l'estomac après ingestion. Ces mycotoxines ne sont pas détruites par autoclavage, mais elles requièrent un chauffage à 480°C pendant 10 min ou 260°C pendant 30 min pour obtenir une inactivation complète. L'utilisation de solutions d'hypochlorite de sodium (3 à 5%) est également efficace pour les inactiver (Heit, 2015).

II.3.1.3. Biosynthèses des trichothécènes

La voie de biosynthèse des trichothécènes est une des mieux documentée à ce jour avec celles des aflatoxines. De nombreux travaux sont menés afin de mieux comprendre les mécanismes biochimiques et génétiques de leur production. Les études génétiques ont montré que les gènes intervenant dans la synthèse des aflatoxines, les gènes impliqués dans la synthèse des trichothécènes sont regroupés en cluster dans le génome. La voie commence par la "cyclisation" du farnesyl pyrophosphate formé par condensation de trois molécules d'isoprène, unité de base des stérols et des stéroïdes. La molécule ainsi formée, le trichodiène, est le précurseur commun à tous les trichothécènes (**Benoît, 2005**).

II.3.1.4. Mode d'action de trichothécènes

Des études de toxicité ont démontré que les trichothécènes agissent comme inhibiteurs de la synthèse des protéines eucaryotes. Les trichothécènes se lient à une des sous-unités ribosomiale et interagissent avec la peptidyltransférase. Cette interaction conduit à l'inhibition de la formation des peptides. La structure chimique du trichothécène est importante dans l'interaction avec la sous-unité ribosomiale. Les trichothécènes sont actifs sur toutes les cellules en voie de division rapide et leur ingestion provoque souvent des troubles digestifs suivis de diarrhées sanglantes ou d'hémorragies intestinales (**Jeunot, 2005**).

II.3.1.5. Toxicologie

Les trichothécènes sont des agents cytotoxiques puissants. Ils peuvent avoir des effets immunotoxiques, hématotoxiques (hémorragies, thrombocytopénie, leucopénie), myélotoxiques et provoquer une nécrose cutanée. Du fait de leurs propriétés cytotoxiques, pour la majorité très marquées, certains trichothécènes ont été étudiés en tant qu'antineoplasiques possibles chez l'homme. Les trichothécènes macrocycliques (groupe D) sont au moins 10 fois plus cytotoxiques que les trichothécènes du type A. La toxicité des trichothécènes du type B atteint seulement 10 % de la toxicité des trichothécènes du type A. Les combinaisons des différents trichothécènes semblent avoir un effet additif quant à leur toxicité (**Brochard et le Bacle, 2009**).

II.3.2. Zéaralénone

La zéaralénone est une mycotoxine ayant des propriétés oestrogéniques, produite par plusieurs espèces de moisissures du genre *Fusarium* se développant dans les céréales (maïs, orge, blé, riz, avoine...), principalement au champ (flore du champ), lors du stockage du maïs

en cribs ou dans l'orge dans la phase de germination et au cours du maltage. Les principales espèces de *Fusarium* productrices appartiennent aux genres *graminearum*, *culmorum*, *equiseti*. Toutes les souches ne sont pas productrices de zéaralénone. (Gallot, 2006).

II.3.2.1. Structure

La zéaralénone est une lactone macrocyclique dérivée de l'acide résorcyclique (Resorcyclic Acid Lacton RAL), de formule brute C₁₈H₂₂O₅. Sa formule développée est représentée sur la (Figure 08). Sa dénomination commune est "zéaralénone". D'autres dénominations ont été utilisées, comme FES (Fermentation Estrogenic Substance), RAL, et F-2. La zéaralénone naturelle existe sous forme de l'isomère trans. Ce dernier est facilement converti en isomère *cis* par irradiation UV à partir d'une lampe à mercure (Gaumy, 2001).

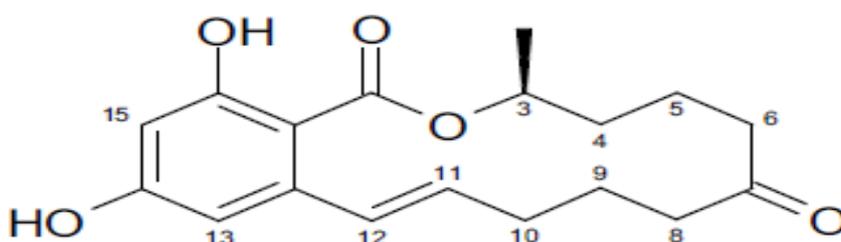


Figure 08 : Structure de la zéaralénone (Bravin, 2008).

II.3.2.2. Propriétés physico-chimiques de zéaralénone

À température ambiante, la zéaralénone se présente sous forme de cristaux blancs. Elle est également insoluble dans le sulfure et le tétrachlorure de carbone. Elle est faiblement soluble dans les solvants apolaires tels que l'hexane, l'heptane ou l'éther de pétrole de par ses substituants alcool et cétone. La solubilité de cette mycotoxine augmente avec la polarité des solvants : benzène, chloroforme, acétate d'éthyle, acétonitrile, acétone. La zéaralénone est thermostable. En effet, elle possède un point de fusion élevé, à environ 164-165°C, et donc résiste fortement aux divers procédés de transformation alimentaire. Par exemple, 60% de la zéaralénone persiste après la cuisson du pain et 80% lors de la production de biscuits. Elle est également retrouvée dans la bière, malgré les procédés thermiques associés à la brasserie (touraillage, brassage, ébullition, pasteurisation). La zéaralénone absorbe la lumière ultraviolette aux longueurs d'onde 236 nm, 274 nm et 316 nm. Le maximum d'absorption à 274 nm est le plus caractéristique et est donc le plus souvent utilisé pour la détection UV (Heit, 2015).

II.3.2.3. Biosynthèse de la zéaralénone

La biosynthèse de la zéaralénone implique la voie de l'acétate polymalonate. En effet,

la synthèse par cette voie conduit à la formation d'un polycétide qui, par deux cyclisations internes et la conversion du groupement hydroxyle en cétone, aboutit à la mycotoxine. Selon l'espèce animale, la réduction de la zéaralénone se fait en présence de NADH et/ou de NADPH. Par exemple, les vaches sont les animaux possédant la plus grande activité zéaralénone réductase NADH dépendante. Suivent ensuite les souris, les porcs, les rats, les lapins et les cobayes (Heit ,2015).

II.3.2.4. Mode d'action de zéaralénone

De nombreuses études ont prouvé que la zéaralénone se fixe sur les récepteurs Oestrogéniques et induit un effet oestrogène-like. Elle est métabolisée dans plusieurs tissus, mais notamment dans le foie où elle est transformée en deux métabolites : l'o-zéaralénol et le -zéaralénol. La zéaralénone n'est pas hautement toxique. Néanmoins, elle a une meilleure affinité pour les récepteurs aux oestrogènes et induit une toxicité plus forte. Elle est ensuite métabolisée par glucuroconjugaison. L'importance des effets observés sur les espèces animales sensibles est donc fonction du taux de transformation en oe-zéaralénol et des capacités de glucuroconjugaison de ces espèces animales (Jeunot, 2005).

II.3.2.5. Toxicologie

La ZEA est responsable d'une réponse oestrogénique chez les ruminants entraînant des troubles de la reproduction et des modifications physiques des organes génitaux diverses. des Œdèmes et hypertrophie des organes génitaux des femelles prépubères. La diminution du taux de survie de l'embryon chez les femelles en gestation, une réduction des quantités de LH et de progestérone produites engendrant une diminution de production laitière et des troubles de la morphologie des tissus utérins, une féminisation des jeunes mâles par la diminution de la production de testostérone, l'infertilité et la mortalité. La ZEA n'est pas considérée comme tératogène ; les doses modérées provoquent quelques malformations mineures du squelette, dues essentiellement à un retard d'ossification, à des doses supérieures aux contaminations naturelles. Chez le porc, on peut mettre en évidence un effet tératogène caractérisé par une altération du développement des membres (Heit, 2015).

II.3.3. Fumonisines

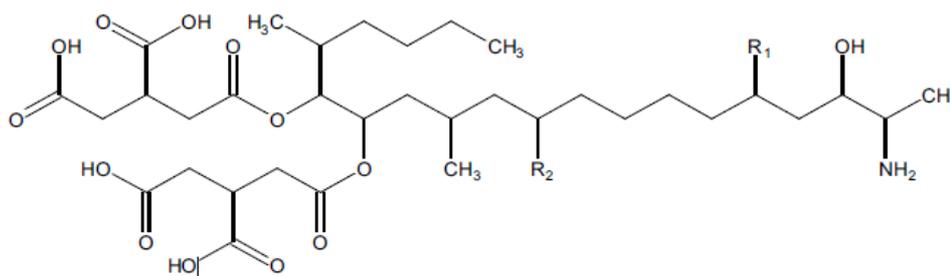
Les fumonisines sont produites principalement par *F. verticillioides* (anciennement *F. moniliforme*), *F. proliferatum* et *F. nygamai*. A ce jour, près de 28 fumonisines ont été répertoriées parmi lesquelles les formes FB1, FB2 et FB3 sont les plus répandues dans l'alimentation et notamment dans le maïs et les produits dérivés. FB1 est la plus abondante et

la plus toxique puisqu'elle représente environ 70 à 80 % des fumonisines contaminant l'alimentation. FB2 est présente à raison de 15-25% tandis que FB3 représente 3 et 8% des contaminations (Heit, 2015).

Les fumonisines (FB) sont des analogues structuraux de la sphinganine et de lasphingosine qui constituent le squelette hydrocarboné des sphingolipides. Ces molécules assurent dans l'organisme plusieurs fonctions dont la croissance, la différenciation et la mort cellulaire (Martinez-Tupia, 2015).

II.3.3.1. Structure

Les fumonisines sont un groupe d'au moins 15 mycotoxines étroitement liées. La plus importante est la fumonisine B1 (FB1). Leurs structures chimiques se basent sur une longue chaîne hydrocarbonée hydroxylée, comportant des groupes méthyle et amines, deux groupes hydroxyles sont estérifiés avec des acides tricarbalyles (propane-1, 2, 3-tricarboxylique). Les fumonisines B2 ne comportent pas de groupe hydroxyle en position 10, par rapport aux fumonisines B1, La structure générale de cette famille est donnée dans la (figure 09) (Gallot et fremy, 2006).



	R ₁	R ₂	Formule brute	Nombre CAS	Masse Moléc.
Fumonisine B1 (FB1)	OH	OH	C ₃₄ H ₅₉ NO ₁₅	116355-83-0	721,838
Fumonisine B2 (FB2)	OH	H	C ₃₄ H ₅₉ NO ₁₄	116355-84-1	705,839
Fumonisine B3 (FB3)	H	OH	C ₃₄ H ₅₉ NO ₁₄	136379-59-4	705,839
Fumonisine B4 (FB4)	H	H	C ₃₄ H ₅₉ NO ₁₃	136379-60-7	689,840

Figure 09 : structures chimiques des fumonisines (Gallot et fremy, 2006).

II.3.3.2. Propriétés physico-chimiques Fumonisines

De par la présence de 4 fonctions acides carboxyliques, les fumonisines sont des molécules hydrophiles, ce qui les rend donc difficiles à étudier. Ces composés sont polaires et ils sont solubles dans l'eau et les solutions aqueuses de méthanol et d'acétonurie, dans lesquelles ils sont généralement extraits. Elles sont en revanche insolubles dans les solvants

apolaires. Par ailleurs, c'est en raison de la faible solubilité lipidique de ces mycotoxines que leur découverte n'a pu être permise qu'en 1988 (Bryła *et al*, 2013). Ces mycotoxines sont également thermostables. Cependant, elles peuvent être dégradées à plus de 90% après chauffage à 175°C pendant 60 min. Elles sont aussi relativement stables lorsqu'elles sont chauffées à pH neutre. Il existe cependant un effet pH, puisque la stabilité thermique est altérée à des pH acides et basiques. Les fumonosines comportant des longues chaînes aliphatiques polyhydroxylées, elles ne possèdent pas propriétés d'absorption de la lumière UV et elles ne sont pas fluorescentes. Une dérivatisation est alors nécessaire pour une détection optique par CLHP (Desjardins, 2006).

II.3.3.3. Biosynthèse de la fumonisines

La synthèse des fumonisines n'est pas encore complètement élucidée. De par leur structure proche de la sphinganine, il est possible que leur biosynthèse soit similaire à la biosynthèse des sphingolipides. Ainsi, la biosynthèse des fumonisines suivrait la voie métabolique des polycétides et proviendrait de la condensation d'un acide aminé, l'alanine, sur un précurseur dérivé de l'acétate. Certains groupements méthyle dériveraient de la méthionine. Différents groupements hydroxyle dérivent de l'acétate et d'oxygène moléculaire. Par ailleurs, une partie de l'acide propane tricarboxylique serait originaire du cycle de l'acide citrique (Bryła *et al.*, 2013; Desjardins, 2006).

II.3.3.4. Mode d'action des fumonisines

La toxicité des fumonisines résulte principalement de l'inhibition de la sphingosine N-acétyl-transférase ou céramide synthétase, qui est une enzyme clé dans la biosynthèse des sphingolipides. Ce mécanisme peut s'expliquer par une double compétition entre les fumonisines et les substrats de la N-acyltransférase pour les sites de fixation ; sphinganine et Acyl-Coenzyme A (Merrill, *et al.*, 2001) (Figure 10). L'inhibition de la synthèse des sphingolipides conduit à l'accumulation des sphinganines libres et à la diminution des céramides et sphingolipides entraînant ainsi l'augmentation du rapport sphinganine/sphingosine (Sa/So) dans le sang et les urines chez plusieurs espèces animales. De ce fait, le rapport Sa/So est utilisé comme un marqueur d'expositions aux fumonisines du type B (Riley, *et al.*, 1994).

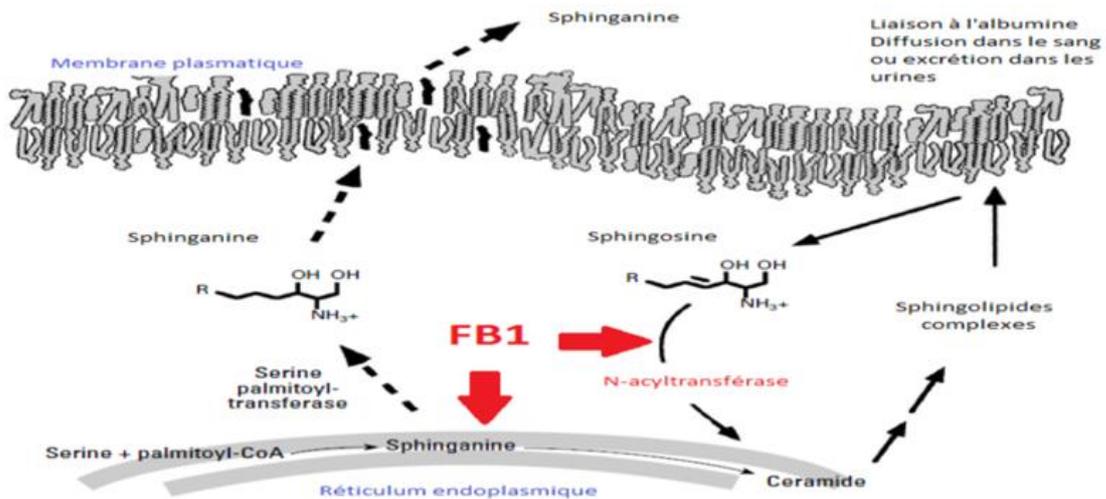


Figure 10 : Action de la FB1 sur le métabolisme des sphingolipides. (Merrill, 2001).

II.3.3.5. Toxicologie

Les fumonisines ont une action toxicologique différente selon leur type. La FB1 présente la plus forte toxicité de cette classe de mycotoxines. Elle provoque une carcinogénicité et elle est hépatotoxique et néphrotoxique. De par sa forte toxicité, elle est classée dans la catégorie 2B (probablement cancérogène) par l'IARC depuis février 2002. Seule la FB1 est classée dans ce groupe (Heit, 2015).

Chapitre III

Méthodes

De diagnostique

Chapitre III : Méthodes de diagnostique

III. Méthodes de diagnostique

Les mycotoxines étant présentes à l'état de traces dans les aliments et matières premières étudiés, il est indispensable d'avoir recours à des méthodes d'analyse extrêmement performantes. Il existe une panoplie de méthodes catégorisées en deux groupes : les méthodes rapides de criblages et les méthodes quantitatives, basées essentiellement sur la séparation chromatographique des molécules puis leur détection par fluorimétrie ou spectrométrie. Avant leur quantification, les mycotoxines présentes dans les produits agricoles sont d'abord extraites et parfois purifiées avant d'être détectées (Huybrechts *et al.*, 2013).

Les méthodes générales et classiquement décrites pour l'analyse des mycotoxines sont schématisées sur la **Figure 11**. A ces techniques, nous pouvons aujourd'hui ajouter la méthode MALDI-TOF, qui se développe de plus en plus ces dernières années.

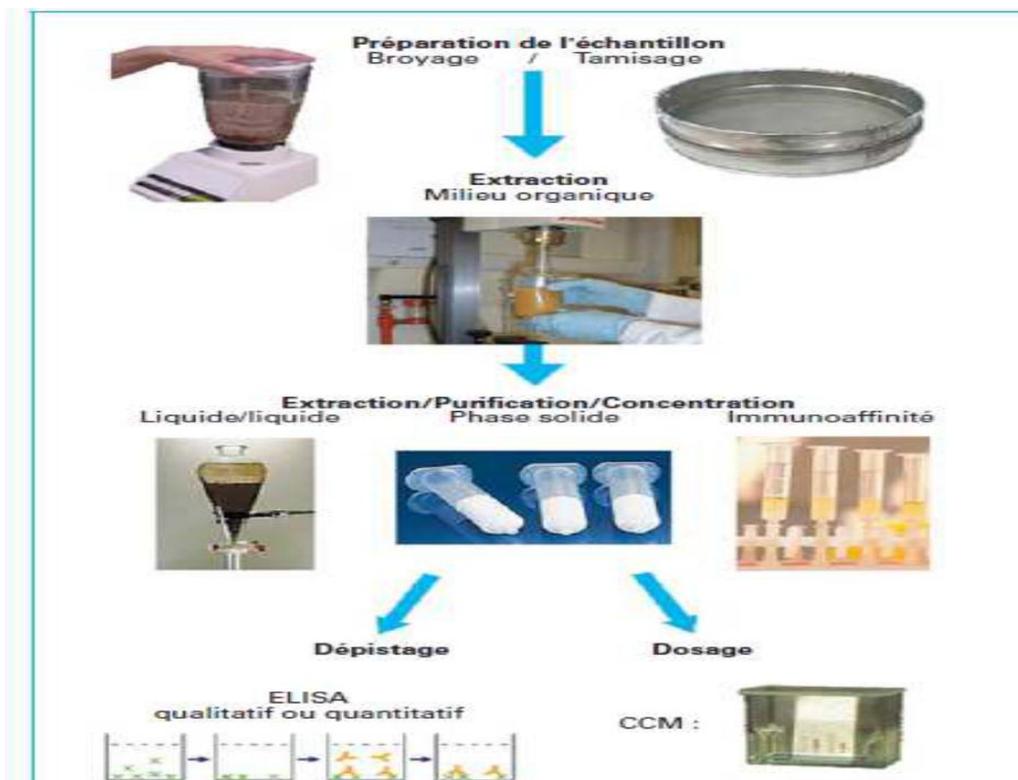


Figure 11 : Principe d'analyse des mycotoxines (Dragacci et Frémy, 2005).

III.1. Extraction liquide - liquide

Cette vieille technique reste encore utilisée pour la préparation d'échantillons à l'aide de solvants comme l'acétonitrile, le chloroforme, le méthanol, l'acétate éthylique, etc. Elle s'applique aussi bien aux échantillons liquides que solides. Pour ces derniers, une pré étape

d'extraction est nécessaire. Différents modes peuvent être utilisés, comme l'extraction conventionnelle de Soxhlet ou l'extraction ultrasonique. Les composés thermiquement moins stables présentent un inconvénient quant à l'utilisation de Soxhlet. Des techniques plus récentes incluent l'extraction par fluide super critique (SFE), l'extraction par liquide pressurisée (PLE), également connue sous le nom d'extraction par solvant accélérée (ASE) et l'extraction assistée par micro - ondes (MAE). Elles exigent moins de solvant et présentent habituellement une meilleure efficacité d'extraction (en termes de rendement) (**Huybrechts et al., 2013**).

III.2. Extraction en phase solide

Pour les trichothécènes, les principales colonnes utilisées pour la purification des extraits sont les colonnes MycoSep, SPE silice et SPE Florisil. Elles contiennent différents adsorbants comme le charbon, la célite et une résine échangeuse ionique. Les colonnes MycoSep sont les plus utilisées et les plus disponibles dans le commerce, capables d'éliminer rapidement des extraits crus, les interférences provenant des matrices. Les composés interférents adhèrent aux adsorbants de la colonne et laissent passer ainsi l'extrait purifié par un fritté. Ces colonnes permettent la purification simultanée et rapide de plusieurs types de mycotoxines. (**Huybrechts et al., 2013**).

III.3. Chromatographie sur couche mince

La CCM a été la première technique utilisée pour l'analyse des mycotoxines. C'est une technique couramment utilisée pour séparer des composés, dans un but analytique ou de purification. Elle comprend une phase stationnaire, constituée d'une couche mince de matériel absorbant (gel de silice), qui est plongée dans une phase mobile liquide (éluant), composée d'un solvant qui va obliger les molécules à se séparer le long de la phase stationnaire. Cette méthode est fondée sur les différences d'affinité des composés vis-à-vis des deux phases. Elle permet la séparation et le dosage simultanés de plusieurs toxines (**Gauthier, 2016**). Cette technique est simple et peu coûteuse mais fournit des résultats plus fluctuants que les techniques chromatographiques liquides et gazeuses. Néanmoins, la CCM reste encore d'application dans beaucoup de laboratoires et la CCM haute performance peut être utilisée comme méthode de criblage. Plusieurs auteurs, et notamment ont utilisé les techniques CCM pour l'analyse des mycotoxines dans les céréales (**Huybrechts et al., 2013**).

III.4. Chromatographie liquide haute pression

Chromatographie liquide haute pression (HPLC) La chromatographie liquide haute pression met en œuvre comme phase mobile, un fluide sous pression. Le liquide traverse une colonne renfermant une phase fixe. La détection peut ensuite être réalisée de différentes

Manières. Sous UV, elle est difficile à mettre en œuvre du fait de l'absence d'absorption des trichothécènes, en particulier ceux du groupe A. Cependant, pour le déoxynivalénol (DON), le dosage est possible. Un dosage par chromatographie liquide à haute pression avec détection UV à 218 nm autorise une détection limite de 17 µg / kg. L'analyse ayant été faite sur des grains de riz, avec une déviation standard de 0,05 à 0,1. On peut aussi réaliser une chromatographie à haute pression avec une détection par fluorescence en utilisant du chlorure de coumarin - 3 - carbonyle. Cette méthode donnerait de très bons résultats pour les trichothécènes du groupe B mais pas pour ceux du group A (**Balzer et al., 2004**).

III.5. Chromatographie en phase gazeuse (CPG)

La chromatographie en phase gazeuse permet de séparer des mélanges complexes par une suite continue d'équilibres s'établissant entre une phase mobile gazeuse et une phase stationnaire liquide, ou parfois solide, placée à l'intérieur d'une colonne. La chromatographie en phase gazeuse ne s'adresse pas seulement aux composés se trouvant naturellement à l'état gaz, mais aussi à tout composé susceptible d'être volatilisé par élévation de la température, sans destruction de celui – ci. Les détecteurs, placés en sortie des colonnes, sont nombreux ; on trouve des méthodes de détection par conductibilité thermique, par ionisation de flamme, par capture d'électrons ... de toutes ces méthodes sont valables pour les trichothécènes . On obtient des limites de détection pour le DON de 10 µg / kg avec une détection par capture d'électrons et de 2 µg / kg avec une détection par ionisation de flamme (**Balzer et al., 2004**).

III.6. La chromatographie gazeuse couplée à un détecteur

Les méthodes de chromatographie gazeuse couplée aux détecteurs à ionisation de flamme (flamme ionization detector [FID]), électron capture detector (ECD) et spectrométrie de masse (MS) étaient les méthodes les plus couramment employées pour la détermination quantitative simultanée des trichothécènes dans les céréales et les produits dérivés. La chromatographie gazeuse couplée à un détecteur MS (GC / MS) offre l'avantage de confirmation de l'identité des pics chromatographiques et peut être aussi utilisée pour détecter plusieurs mycotoxines simultanément. Comme la plupart des mycotoxines ne sont pas volatiles, la dérivation est une étape obligatoire avant les analyses par GC, ce qui complique davantage l'étape de préparation des échantillons et augmente le coût des analyses. Les trichothécènes doivent être normalement dérivés afin d'atteindre la volatilité et la sensibilité voulue par l'analyse GC. Elle est donc réservée à l'étude de mycotoxines qui peuvent être volatilisées par dérivation comme les trichothécènes principalement de type A. La dérivation des trichothécènes

est généralement basée sur celle des groupements hydroxyyles afin de former des dérivés triméthylsilyl A gra (TMS) , trifluoroacétyl (TFA) , penta fluoropropionyl(PFP) ou heptafluorobutyryl (HFB) (**Huybrechts *et al*, 2013**).

III.7. Chromatographie liquide couplée au spectromètre de masse (CL / SM)

Dans la chromatographie liquide couplée au spectromètre de masse, les toxines sont séparées en chromatographie liquide puis dosées par spectrographie de masse. Pour les trichothécènes du groupe A, la chromatographie liquide couplée au spectromètre de masse permet une limite de détection comprise entre 50 et 85 µg / kg. Pour les trichothécènes du groupe B, les limites de détection sont un peu moins bonnes. Il est possible de détecter jusqu'à 6 ug / kg de DON. La chromatographie était réalisée avec des échantillons de farine de froment noir extrait avec de l'acétonitrile et eau puis extraits en phase solide. Cette méthode a été adoptée comme méthode de vérification par l'AOAC (**Balzer *et al.*, 2004**).

III.8. Techniques rapides

III.8.1. Kits de dosage

Aujourd'hui, il existe des kits de dosage ELISA commerciaux pour permettre une détection rapide des mycotoxines. Ces kits, basé sur une réaction compétitive, utilisent soit un anticorps spécifique de la molécule cible, soit un conjugué enzymatique et l'anticorps. L'analyse est généralement quantitative, mais elle peut être qualitative ou semi-quantitative. Ces kits sont simples et rapides d'utilisation et ils sont portatifs, ce qui permet de les emmener partout, même directement au champ pour le cas des mycotoxines. Cependant, ils sont à usage unique et chaque kit contient une enzyme spécifique. Il est possible de trouver des kits T2/HT2, des kits fumonisines, des kits zéaralénone... Il n'est donc pas possible d'évaluer une multicontamination en un test unique et les coûts peuvent donc devenir rapidement élevés. De plus, pour certaines mycotoxines, il n'existe, tout simplement, pas de kit, ce qui ne permet pas d'analyse. Par ailleurs, la sensibilité des anticorps, mono- et polyclonaux est relativement étroite. La gamme de détection est donc restreinte. Ces kits sont parfois peu spécifiques, avec de nombreuses réactions croisées. Ceci est notamment illustré pour le dosage de la DON. En effet, les kits ne font pas de différenciation entre la DON et ses métabolites (3-ADON et 15-ADON), ce qui entraîne une surestimation dans les échantillons (**Grosjean *et al.*, 2002**).

III.8.2. MALDI

Comme pour la CLHP et la CPG MS/MS, l'association en série de plusieurs spectromètres de masse est utilisée avec la technique MALDI. Le couplage MS/MS a été mis au point pour augmenter le phénomène de fragmentation des ions métastables sans être dépendant de la spontanéité de ces décompositions (Heit, 2015).

III.9. Méthode génétique

Au cours de la dernière décennie, une nouvelle technique basée sur la génétique a été mise au point. Contrairement aux méthodes immuno enzymatiques et physicochimiques, cette méthode de biologie moléculaire est mise en place en tant que test prédictif pour l'évaluation du potentiel toxigène des céréales. Cette méthode, basée sur le gène Tri5, est aujourd'hui utilisée pour les trichothécènes, car ce gène Tri5 code pour la synthèse de la trichodiènesynthase, enzyme agissant en amont de la synthèse des trichothécènes (Barchietto *et al.*, 2002; Jeunot, 2005).

Cette méthode est plus rapide que les méthodes microbiologiques classiques, mais ne permet de détecter que les espèces potentiellement productrices de trichothécènes. En effet, la présence du gène Tri5, n'entraîne pas nécessairement la synthèse de trichothécènes, mais seulement un risque potentiel de production par la souche donnée. Cette méthode est complémentaire des techniques analytiques physico-chimiques et immuno enzymatiques grâce à son caractère prédictif. Elle évalue le risque de production (au champ ou pendant le stockage), alors que les autres techniques détectent la présence ou l'absence de mycotoxine. Elle ne peut cependant pas remplacer les analyses de référence dans le domaine agro-alimentaire pour justifier de la conformité d'un lot. Cette méthode indirecte est donc très incertaine, tant qualitativement que quantitativement, et peut être surtout utilisée pour effectuer une analyse de risque (Heit, 2015).

Chapitre IV

*Les moyens de lutte contre
les mycotoxines.*

Chapitre IV : Les moyens de lutte contre les mycotoxines.

IV. Les différentes stratégies de lutte contre les mycotoxines

La présence inévitable et imprévisible des mycotoxines dans les denrées alimentaires entraîne des problèmes économiques tout au long de la chaîne alimentaire et peut poser des problèmes sanitaires aussi bien chez l'animal que chez l'Homme. Ainsi, il est primordial de développer des mesures afin de contrôler la contamination de la chaîne alimentaire. Des stratégies de lutte contre les moisissures et leurs toxines sont mises en place, y compris :

- Des stratégies préventives destinées à réduire ou inhiber la prolifération fongique ainsi que la biosynthèse de mycotoxines ; (**Codex Alimentarius Commission, 2002**).
- Des stratégies préventives des mycotoxicoses.
- La décontamination des denrées alimentaires contaminées par élimination, destruction ou inactivation des mycotoxines présentes sur la matrice.
- Les méthodes physiques, chimiques et biologiques pour éliminer et réduire la propagation des mycotoxines.

IV.1. Les stratégies préventives des contaminations

Une bonne compréhension des facteurs favorables à l'infection, à la croissance et à la production de toxines est une condition indispensable pour la mise au point de stratégies préventives contre la contamination mycotoxique des produits agricoles. Le « Codex Alimentarius » recommande des pratiques pour la réduction de la contamination mycotoxique au niveau des denrées alimentaires, en particulier les céréales (**Codex Alimentarius Commission, 2002**).

Les bonnes pratiques agricoles représentent la première ligne de défense contre la contamination des céréales par les mycotoxines, suivie par la mise en œuvre de bonnes pratiques de fabrication durant la manutention, l'entreposage, la transformation et la distribution des céréales destinées à l'alimentation humaine et animale. En outre, l'utilisation de systèmes intégrés de contrôle (**HACCP : Hazard Analysis and Control Critical Point**) pourrait être une bonne stratégie de lutte, basée sur la mise en évidence des points à risque et le contrôle des points critiques à tous les stades de production, du champ jusqu'au consommateur (**Codex Alimentarius Commission, 2002**).

Ceci permettra la gestion du risque et le développement des méthodes de suivi et de vérification. En effet, les champignons peuvent produire les mycotoxines en plein champ, au

cours de la récolte et pendant le stockage et la transformation industrielle de la matière première (**European Commission report, 1999**).

VI.2. Stratégies de contrôle précédant la récolte

Plusieurs stratégies agronomiques se sont développées pour réduire le risque de l'invasion fongique et la production des mycotoxines en plein champ. Cependant, une bonne préparation du champ avant semaison par l'élimination de tout résidu propice à la croissance de champignons producteurs de mycotoxines et la rotation des cultures permettront de réduire l'inoculum au champ et son transfert aux récoltes qui s'en suivent (**Cleveland et al., 2003**).

Parmi les bonnes pratiques préventives de la survenue d'une contamination fongique et mycotoxique au champ, nous citons la sélection de variétés végétales adaptées et résistantes à l'attaque des ravageurs et à l'invasion fongique, la fertilisation appropriée du sol (besoins nutritionnels), le maintien d'un environnement dépourvu de mauvaises herbes (désherbage), l'utilisation efficace de biocides (fongicides, pesticides, insecticides) et l'irrigation raisonnée (**Cleveland et al., 2003**).

VI.3. Stratégies de contrôle pendant la récolte

Afin de lutter contre la contamination par les mycotoxines pendant la récolte, il est recommandé de contrôler l'humidité et de tenir en compte la maturation des graines ainsi que les méthodes de récolte pour éviter l'endommagement (porte d'entrée aux champignons toxigènes) des produits agricoles. Les grains devraient être récoltés à pleine maturité. De même, les dommages mécaniques et le contact avec le sol durant la récolte devraient être limités autant que possible. Les conteneurs (wagons, camions) utilisés pour la collecte ainsi que le transport des grains récoltés du champ jusqu'aux installations de séchage et d'entreposage après le séchage, devraient être propres, secs et exempts d'insectes, de moisissures et de toute matière contaminée, aussi bien avant qu'après l'emploi (**Codex Alimentarius Commission, 2002**).

VI.4. Stratégies de contrôle après la récolte

Les stratégies préventives après la récolte se basent essentiellement sur l'amélioration des conditions de séchage et de stockage et l'utilisation d'agents chimiques et biologiques appropriés. Pour réduire la contamination par les mycotoxines pendant le stockage et le transport, il est important de contrôler les teneurs d'humidité et les fluctuations de température, la pénétration d'insectes, d'oiseaux et de rongeurs ainsi que les conditions d'hygiène. Tout matériel en contact avec la récolte et les structures de stockage devraient être propre afin de limiter au maximum la contamination par des champignons. L'assainissement

des locaux par des traitements chimiques est impératif en cas de contamination de la récolte précédente. (Codex Alimentarius Commission, 2004).

IV.5 Les méthodes chimiques

Une variété d'agents chimiques tels que les acides, les bases (ammoniaque, soude), des agents oxydants (peroxyde d'hydrogène, ozone), des agents réducteurs (bisulfites), des agents chlorés, du formaldéhyde sont utilisés pour dégrader ou biotransformer les mycotoxines et plus particulièrement les aflatoxines (Yiannikouris et Jouany, 2002).

VI.5.1 Dénaturation chimique

Une modification de structure d'un xénobiotique peut être effectuée par différents types de réactions chimiques (hydrolyse des époxydes et esters, oxydation des insaturations...). La méthode utilisée est forcément spécifique de la structure du composé à dégrader, et par là même d'une famille de mycotoxines (Fig 13). Comme pour les méthodes de dénaturation physique, les méthodes chimiques laissent des «résidus » de mycotoxines sur les aliments traités, dont il faudra s'assurer de l'absence de toxicité. Les effets des différents traitements chimiques des aliments selon les toxines en cause sont résumés dans le tableau 06 (Guerre, 2000).

Tableaux 06 : Efficacité comparée des méthodes chimiques de décontamination (Guerre, 2000).

Méthode	Toxine	Efficacité
Acides et bases		
Ammoniation	Aflatoxines	+++
	Fumonisines	?
Nixtamalisation	Aflatoxines	+et?
	Fumonisines	?
Nixtamalisation+H₂O	Fumonisines	+
Oxydants et réducteurs		
Eau oxygénée	Aflatoxines	+
Bisulfites	Aflatoxines	+
Glucose, fructose	Fumonisines	+

+++ : dénaturation et diminution importante de la toxicité ; + : effet bénéfique ; - : effet néfaste ; ? : dénaturation sans modification de la toxicité.

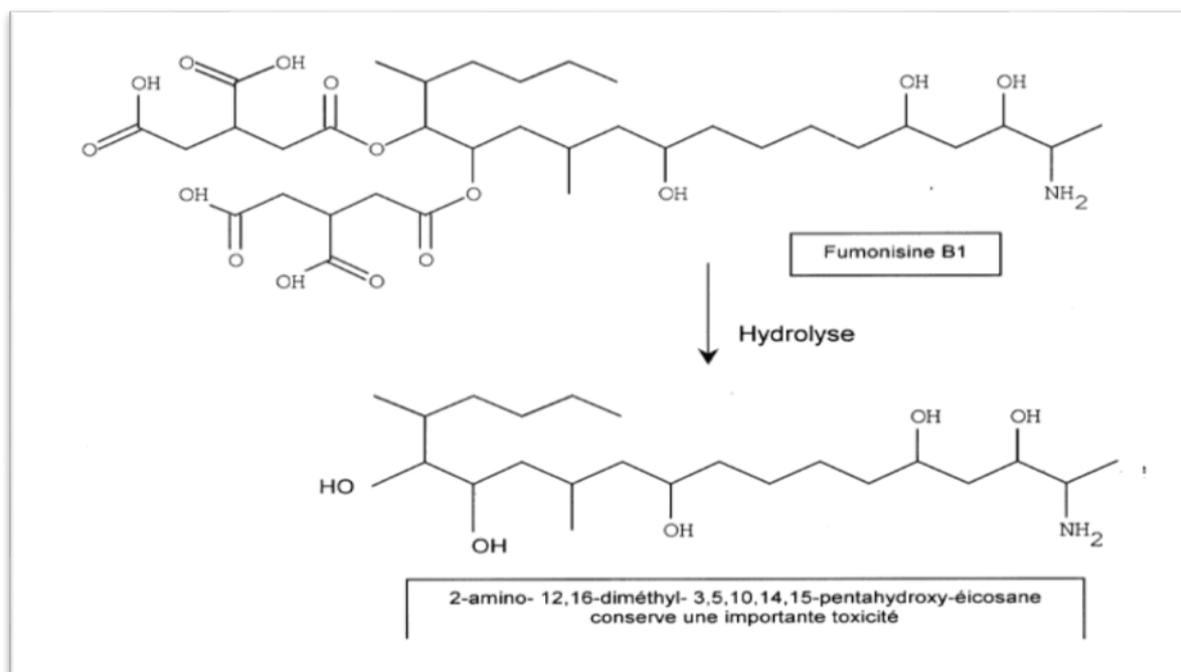


Figure 12 :Structure des mycotoxines et sensibilité aux traitements chimiques exemple de la fumonisine B1 (**Guerre, 2000**).

VI.6.Méthodes biologiques

La décontamination biologique en routine des denrées vis-à-vis des trichothécènes n'est pas encore à l'ordre du jour. Tout au plus, commence-t-on à apercevoir des pistes permettant l'inactivation de certaines toxines (**Balzer, 2004**).

Les voies principales de recherche concernent la fermentation des aliments, l'ajout d'enzymes et la sélection génique. La fermentation peut permettre de réduire la concentration en toxines dans une denrée. En effet, une étude a montré que du maïs contaminé par la toxine T-2, ayant subi une fermentation par *Candida intermedia*, perd 90% de sa toxicité ; toutes les toxines étaient dans le liquide de fermentation, facilement récupérable rappelons que la fabrication de la bière n'est en aucun cas un processus de décontamination de l'orge. On retrouve les trichothécènes dans le produit fini (**Balzer, 2004**).

Pour les enzymes elles-mêmes, il a été montré que l'époxyde hydratase ou la glutathion sépoxyde hydratase réduisent la toxicité de la toxine T-2 et du déoxynivalénol. De même, la carboxyestérase du foie semble détoxifier la toxine HT-2, la fusarénone X, le diacétoxyscirpénol. Ces découvertes permettent d'envisager de nouvelles voies de décontamination, mais les recherches sur ce sujet sont encore en cours (**Bouras et al., 2020**).

Une dernière piste est celle de la sélection génétique. Si on arrive à isoler et cloner les gènes de bactéries responsables de la production d'enzymes détoxifiantes, il sera alors possible d'incorporer ce gène au sein des plantes. Des travaux sont en cours en ce qui concerne l'inhibition de synthèse ou la dégradation du DON. D'autres recherches essaient d'insérer le site actif d'un anticorps développé contre le DON en espérant que cet anticorps sera produit par la plante et se liera au DON ce qui le rendra inactif (**Balzer et al., 2004**).

Des recherches sont effectuées afin de développer de nouvelles classes de ligands naturels des mycotoxines. Ainsi, les glucomannanes issus de la partie externe des parois de la levure *Saccharomyces cerevisiae* sont capables de lier in vitro certaines mycotoxines (**tableau IIV**). Leur grande capacité de liaison est due à leur large surface d'échange (**Yiannikouris et Jouany, 2002**).

Les huiles essentielles, l'ozone, la terre à diatomées et les antioxydants alimentaires tels que l'hydroxyanisole butylé (BHA), l'hydroxytoluène butylé (BHT) et le parabène de propyle (PP) sont des options rentables non toxiques et prometteuses qui peuvent remplacer les conservateurs chimiques toxiques dans la lutte contre divers champignons y compris *Aspergillus*, *Fusarium* et *Penicillium* (**Chulze, 2010**).

Tableau IIV : Capacité des glucomannanes de *Saccharomyces cerevisiae* à lier les mycotoxines (**Yiannikouris et Jouany, 2002**).

Mycotoxines	% de mycotoxine liee
AFLATOXINES TOTALES	95.0
FUMONISINES	67.0
ZEN	77.0
T-2	33.4
CITRININE	18.4
DAS	12.7
DON	12.6
OTA	12.5
NIV	8.2
FUSARIOTOXINES	7.9

VI.7. Les méthodes physiques

Des méthodes telles que l'élimination des grains contaminés, la recherche par fluorescence de la présence de toxines produites par *Aspergillus flavus* ou d'autres champignons, le lavage par de l'eau ou du carbonate de sodium afin de réduire la

concentration des toxines de *Fusarium spp* dans le maïs, l'inactivation thermique à haute température, l'irradiation par UV, rayons X ou micro-ondes, l'extraction des aflatoxines par des solvants ont pu être utilisées (**Scott 1998**).

Les mycotoxines sont en général thermostables et elles résistent à tous les procédés utilisés pour l'élimination des microorganismes (stérilisation). Il est à noter que les traitements thermiques dépendent en grande partie d'autres facteurs tels la teneur de l'aliment contaminé en eau et de son pH. Des méthodes satisfaisantes pour l'élimination des mycotoxines ne sont pas encore mises au point. Cependant l'irradiation peut être envisagée pour lutter contre les moisissures toxigènes (**Dieme et al., 2016**).

VI.7.1 Elimination des fractions altérée

L'élimination des fractions altérées fait intervenir différentes méthodes de nettoyage ou séparation en vue d'éliminer les parties les plus altérées des matières premières. Ces méthodes, parfois très simples. Elle doit être préconisée chaque fois qu'elle est possible. Son efficacité est liée à la nature de l'invasion fongique (contamination de surface ou en profondeur) et aux caractéristiques des toxines (concentration des aflatoxines, liposolubles, dans les fractions riches en graisses, concentration des fumonisines, hydrosolubles, dans les eaux de trempage). Si l'équipement de séparation est standardisé, certaines de ces méthodes peuvent représenter un intérêt dans le traitement de certaines matières premières (tamisage du maïs par exemple, en vue de diminuer les niveaux de contamination en fumonisines) (**Guerre, 2000**).

VI.7.2.Traitements thermique

Les fumonisines sont considérées comme résistantes à la chaleur, bien que les aliments à base de maïs ayant subi un traitement thermique (maïs en conserve, galettes de maïs et céréales de table) aient généralement des concentrations inférieures aux produits non traités (farines, purée de maïs) (**Guerre, 2000**). Lors de la cuisson de la farine de blé, entre 90 et 120 °C, on peut obtenir une dégradation de l'ordre de 16 à 69 % du déoxynivalénol (**Balzer et al., 2004**).

VI.7.3.Irradiations

Les radiations ionisantes peuvent permettre de réduire le taux de contamination en certaines en mycotoxines. Toutefois, peu d'études montrent une réelle application aux trichothécènes. De même, les micro-ondes ne détruisent les trichothécènes qu'à très fortes doses, ce qui rend leur utilisation impossible dans les conditions normales de préparation des

aliments. Les radiations ultraviolettes semblent n'avoir aucun effet sur les trichothécènes des groupes A et B (**Balzer et al., 2004**).

IV.8 Adsorption des toxines

Le charbon actif peut permettre la réduction des lésions de la sphère buccale lors d'ingestion de grains contaminés par la toxine T-2, s'il est distribué en même temps que la ration contaminée. Ainsi, le charbon activé permet d'adsorber 9,9 mg de DON et de toxine T-2 par g de charbon car c'est un adsorbant non spécifique. Il peut en effet permettre de réduire le taux de nombreuses toxines, avec d'ailleurs un pouvoir adsorbant bien plus important pour certaines mycotoxines de stockage (aflatoxines : 120 mg/g ; ochratoxine 124 mg/g) (**Balzer et al., 2004**).

Les argiles (les aluminosilicates, la bentonite, les zéolites...) sont aussi utilisées comme adsorbants vis-à-vis des mycotoxines depuis une vingtaine d'années. Malheureusement, la plupart des études concernent les aflatoxines très rares sont celles concernant les trichothécènes. Parmi elles, une étude a montré que la terre de diatomée a une capacité d'adsorption des trichothécènes de 0,5 à 1,5 mg/g. Un autre exemple montre que les bentonites adsorbent la toxine T-2 du fait de l'interchangeabilité des cations positionnés sur les différentes couches mais pas les autres trichothécènes (**Balzer et al., 2004**).

Les zéolites permettent aussi une adsorption partielle du DON, en revanche, d'autres argiles comme la kaolinite, la sépiolite et la montmorillonite ne fixent que très médiocrement les trichothécènes. Pour d'autres encore, les aluminosilicates seraient totalement inefficaces contre les toxines telles que le DAS, le DON et la toxine T-2 (**Balzer et al., 2004**).

VI.9 Les limite de lutte des mycotoxines

La lutte contre les toxines est complexe. Elle revêt une importance considérable de par le danger et la fréquence de la contamination de nombreuses matières premières et produits de transformation. La remarquable stabilité des toxines implique que la meilleure lutte reste la prophylaxie. Les méthodes chimiques et biologiques demeurent peu évaluées et n'ont donc que peu d'applications en pratique. La génétique est une piste prometteuse pour l'avenir (**Balzer et al., 2004**).

Le développement d'outils physiques, chimiques ou biotechnologiques destinés à améliorer la production des semences, la culture, la récolte et le stockage des fourrages et des céréales reste indispensable pour réduire le niveau de contamination des aliments. Cependant, l'élimination totale des moisissures et des toxines qui leur sont associées est impossible, c'est pourquoi il semble important de compléter le panel des mesures préventives par l'emploi

Chapitre IV : les moyens de lutte contre les mycotoxines

d'agents capables de lier les toxines et d'en limiter la biodisponibilité chez l'animal (peut-être aussi chez l'Homme). Des recherches sont conduites actuellement sur la compréhension des mécanismes de fixation des toxines par des ligands naturels. Elles devraient déboucher sur la conception de produits capables de fixer un plus grand nombre de mycotoxines sans limiter la biodisponibilité des nutriments et des micronutriments des aliments destinés aux animaux d'élevage. Des applications de ces produits dans l'alimentation humaine au sein de zones géographiques à risque peuvent être envisagées (**Yoon et Baek, 1999**).

Conclusion

Conclusion

Les mycotoxines sont des composés issus du métabolisme secondaire des moisissures et sont dotées d'un potentiel toxique réel à l'égard de l'homme et de l'animal. Les toxines fongiques se retrouvent à l'état de contaminants naturels dans de nombreuses denrées destinées à l'alimentation animale et humaine telles que les céréales, les abats, les fruits, les légumes, les fourrages et les produits laitiers. Les familles de mycotoxines considérées comme importantes d'un point de vue alimentaire et sanitaire sont les aflatoxines, les fumonisines, les ochratoxines, les alcaloïdes de l'ergot du seigle, la zéaralénone, la patuline et les trichothécènes. Ces toxines sont essentiellement produites par cinq genres de champignons : *Fusarium*, *Aspergillus*, *Claviceps*, *Alternaria* et *Penicillium*. **(Calvin, 2017).**

Les *Fusarium* sont des organismes ubiquitaires, susceptibles de se développer à tous les stades de la production agro-alimentaire ; que ce soit aux champs, au moment du stockage ou lors de la transformation. Du champ jusqu'à l'assiette du consommateur, de nombreux champignons sont susceptibles de se développer et de sécréter des toxines fongiques, si un certain nombre de conditions sont réunies. **(Aissaoui, 2018).**

Hormis leur impact économique pour les éleveurs, les agriculteurs et l'industrie agroalimentaire, les mycotoxines représentent un réel danger pour la santé humaine et animale, par leur responsabilité dans l'apparition de phénomènes de toxicité aiguë et chronique. Leurs effets sont insidieux et difficilement quantifiables : cancérogénèse, hépatotoxicité, néphrotoxicité, immunotoxicité, hématotoxicité, neurotoxicité, tératogénèse, génotoxicité...

Devant ce constat, il est nécessaire de mettre en place des moyens de lutte et de prévention tout au long de la chaîne alimentaire, comprenant des stratégies agronomiques (bonnes pratiques culturales, traitements fongicides réfléchis, choix des variétés cultivées...), ainsi que l'amélioration des conditions de récolte, de stockage et de transformation. La prévention passe donc par une sensibilisation des différents acteurs des professions de l'industrie d'agro-alimentaire (éleveurs, agriculteurs...), mais aussi par l'information et l'éducation du consommateur. Par ailleurs, la mise en place de réglementations algériennes, ainsi que l'amélioration de la compréhension des effets toxiques et des modes d'action des mycotoxines représentent un axe important dans la lutte contre leur prolifération. **(Aubert, 2017).**

Références bibliographiques

- **Adjou, E. S., Kouton, S., Dahouenon-Ahoussi, E., Soumanou, M. M., & Sohounhloue, D. C. (2013).** Effect of essential oil from fresh leaves of *Ocimum gratissimum* L. on mycoflora during storage of peanuts in Benin. *Mycotoxin research*, 29(1), 29-38.
- **Alami, O, 2018,** Impact de la mycotoxine déoxynivalénol (DON) sur la défense immunitaire et la flore intestinales, les paramètres biochimiques sériques et sur l'architecture histologique des organes cibles de la souris Swiss (Doctoral dissertation, Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella).
- **Aloui, N. (2018).** Etude de la contamination fongique alimentaire et mycotoxines (Doctoral dissertation).
- **Anonyme, 2006 :** Maladies et insectes du Blé. Ed. Rev. Syngenta. P 8-15.
- **Atoui A , (2006)** Approche de la mycotoxinogénèse chez *Aspergillus ochraceus* et *Aspergillus carbonarius*: étude moléculaire et physiologique. Thèse de doctorat d'université : Microbiologie et biocatalyse industrielles. Toulouse : Institut National Polytechnique. France. P:17.
- **Aubert, M. (2017).** Quantifier ou l'art de mesurer l'utilisation des produits phytosanitaires: analyse empirico-formelle de la gestion sanitaire et environnementale des producteurs horticoles (Doctoral dissertation, Institut National d'Etudes Supérieures Agronomiques de Montpellier).
- **Balzer, A., Tardieu, D., Bailly, J. D., & Guerre, P. (2004).** Les trichothécènes: nature des toxines, présence dans les aliments et moyens de lutte. *Revue Méd. Vét*, 155(6), 299-314.
- **Barchietto, T., Calaora, V., Petat, J. M., & Seng, J. M. (2002).** Sécurité des aliments: l'exemple du blé Recherche et mise au point d'une méthodologie innovante: le test Tri5. *PHYTOMA*, 4-7.
- **Botton, B., Breton, A., Fèvre, M., Guy, P. H., Larpent, J. P., & Veau, P. (1990).** Moisissures utiles et nuisibles. Importance industrielle. 2e éd. revue et complétée. Paris, Milan, Barcelone: Masson, 512.
- **Bouras, N., Mokrane, S., Riba, A., & Holtz, M. D. (2020).** Toxines T-2 et HT-2 : Mini revue. *International Journal of Natural Resources and Environment. Inter. J. Nat. Resour. Env. : Vol. 2, No. 2; pp. 17-29.*

- **Brochard, G., & Le Bacle, C. (2009).** Mycotoxines en milieu de travail. Origine et Propriétés Toxiques des Principales Mycotoxines. INRS, Documents pour le Médecin Du Travail, 119.
- **Bryła, M., Roszko, M., Szymczyk, K., Jędrzejczak, R., Obiedziński, M.W., and Sękul, J. (2013).** Fumonisin in plant-origin food and fodder – a review. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 1626–1640
- **Cahagnier, B. (2001).** Céréales et mycotoxines. généralités, présence, dosage. *Industries des Céréales. Rev.* (122), 22-29.
- **Calvin, I., Van Emery, M., Freddy, O., Beaudouin, K., Louis, N., Joël, M..., & Hussaini, A. (2017).** Les Mycotoxines dans les Aliments Consommés à Kinshasa, République Démocratique du Congo (RDC).ISSN: 2410-4299, article ; *International Journal*.
- **Castegnaro, M., & Pfohl-Leskowicz, A. (2002).** Les mycotoxines : contaminants omniprésents dans l'alimentation animale et humaine. *La sécurité alimentaire du consommateur*, 2, 127-79.
- **Champeil, A. (2004).** Contribution à la compréhension des effets des systèmes de culture sur l'infection des cultures de blé tendre d'hiver par la fusariose et la contamination des grains par les mycotoxines associées (Doctoral dissertation, Paris, Institut national d'agronomie de Paris Grignon).
- **Charmet, G., Bony, S., Fardet, A., Abecassis, J., Lullien-pellerin, V., Richard-Forget, F., 2016.** Ouvrage collectif groupe filière INRA, Agriculture et alimentation durables dans la filière céréales. Trois enjeux clés : teneur en protéines, qualités sanitaire et nutritionnelle, Rédactrice du chapitre « qualité sanitaire. Ed. QUAE.
- **Cleveland T. E., Dowd P. F., Desjardins A. E., Bhatnagar D., Cotty P. J. (2003).** United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service research on preharvest prevention of mycotoxins and mycotoxigenic fungi in US crops. *Pest Management Science*. 59: 629–642.
- **Codex Alimentarius Commission. (2002).** Proposed draft code of practice for the prevention (reduction) of mycotoxin contamination in cereals, including annexes on ochratoxin A, zearalenone, fumonisins and trichothecenes. CX/FAC 02/21. Joint FAO/WHO Food Standards Programme, Rotterdam, The Netherlands.
- **Codex Alimentarius Commission. (2004).** Code of Practice for the prevention and reduction of aflatoxin contamination in peanuts. CAC/RCP, 55. conséquences. Conférences prononcées dans le cadre de la réunion de la "Section contrôlant la

dureté/tendreté de l'albumen du grain de blé par l'étude de lignée quasiisogénique. Thèse de doctorat. p17.

- **De Boevre, M., Di Mavungu, J.D., Maene, P., Audenaert, K., Deforce, D., Haesaert, G., Eeckhout, M., Callebaut, A., Berthiller, F., Van Peteghem, C., et al. (2012).** Development and validation of an LC-MS/MS method for the simultaneous determination of deoxynivalenol, zearalenone, T-2-toxin and some masked metabolites in different cereals and cereal-derived food. *Food Additives & Contaminants: Part A* 29, 819–835.
- **Debourgogne, A. (2013).** Typage moléculaire du complexe d'espèces *Fusarium solani* et détermination de son mécanisme de résistance au voriconazole .Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.
- **Dieme, E., Fall, R., Sarr, I., Sarr, F., Traore, D., & Seydi, M. (2016).** Contamination des céréales par l'aflatoxine en Afrique: revue des méthodes de lutte existantes. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(5), 2285-2299.
- **Dragacci, S., Grosso, F., & Fremy, J. M. (2005).** Analyse et détection des mycotoxines. *Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation*, (P3330).
- **El Assaoui, M. (2018).** Contamination des aliments par les mycotoxines : méthodes de prévention, de lutte et de décontamination (Doctoral dissertation).
- **European Commission Report. (1999).** Opinion on the relationship between the use of plant protection products on food plants and the occurrence of mycotoxins in foods. European Commission SCP/RESI/063, Belgium.
- **FAO state 2020.** Données statistiques de la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations) www.FAOstate.com.
- **FAO, 2020.** Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- **FAO. 2021.** Production: Crops and livestock products. In: FAO. Rome. Cited March 2022. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- **Gallot, S., & Fremy, J. M. (2006).** Evaluation des risques liés à la présence des mycotoxines dans les chaînes alimentaires humaines et animales. Rapport synthétique AFSSA, Paris, 25.
- **Gauthier, A. (2016).** Les mycotoxines dans l'alimentation et leur incidence sur la santé. *Sciences pharmaceutiques*. dumas-01315198.
- **Gauthier, A. (2016).** Les mycotoxines dans l'alimentation et leur incidence sur la santé. *Sciences pharmaceutiques*. dumas-01315198.

- **Grosjean, F., Leuillet, M., Berhaut, P., Niquet, G., and Orlando, D. (2002).** Dossier Mycotoxines. Perspectives Agricoles -N°278 28–42.
- **Guerre, P. (2000).** Intérêt des traitements des matières premières et de l'usage d'adsorbants lors d'une contamination des aliments du bétail par des mycotoxines. *Revue Méd. Vét.*, 151(12), 1095-1106.
- **Heit, S, (2015).** Identification de *Fusarium* et détection des mycotoxines associées par MALDI-TOF (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- **Husson O., Charpentier H., Michellon R., Razanamparany C., Moussa N., Enjalric F.K.N., Rakotondramanana et Seguy L. (2012).** Avoine *Avena sativa* et *Avena strigosa*. Manuel pratique du semis direct à Madagascar. 3.
- **Huybrechts, B., Tangni, E. K., Debongnie, P., Geys, J., & Callebaut, A. (2013).** Méthodes analytiques de détermination des mycotoxines dans les produits agricoles: une revue. *Cahiers Agricultures*, 22(3), 202-215.
- **Jeunot, B. (2005).** Les fusariotoxines sur céréales : détection, risque et nouvelle réglementation (Doctoral dissertation, UHP-Université Henri Poincaré).
- **Lahouar, A. (2016).** Mycotoxines et champignons mycotoxinogènes dans les grains de sorgho commercialisé en Tunisie : Incidence et profils écophysiologiques (Doctoral dissertation, Université de Lleida).
- **Le Bars J., Le Bars P., (1987)** Les moisissures des denrées alimentaires et leurs
- **Lesage V. (2011).** Contribution à la validation fonctionnelle du gène majeur
- **Madr. (2005).** Données statistiques du Ministère de l'agriculture. Bureau de la statistique université. Mentouri, Constantine.
- **Martinez-Tupia, C. (2015).** Dégradation de la Fumonisine B1 par la communauté microbienne dans les ensilages de maïs grain humide (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
- **Merrill A.H, Sullards M.C, Wang E, et al. (2001).** Sphingolipid metabolism : roles in signal transduction and disruption by fumonisins. *Environ Health Perspect*, 109, 283-28.
- **Mialoundama, F. (2020).** Principales plantes alimentaires du Congo. Principales plantes alimentaires du Congo, 1-455. MidiPyrénées" à Toulouse.
- **Moule, C. (1971).** Céréales. La Maison rustique.
- **Nguyen, M. T. (2007).** Identification des espèces de moisissures, potentiellement productrices de mycotoxines dans le riz commercialisé dans cinq provinces de la

région centrale du vietnam: étude des conditions pouvant réduire la production des mycotoxines (Doctoral dissertation).

- **Pasquet, J. C. (2014).** *Détoxification des mycotoxines par les plantes: analyse de l'interaction entre Brachypodium distachyon et Fusarium graminearum* (Doctoral dissertation, Paris 11).
- **Rkiba, z. (2020).** les mycotoxines alimentaires. P0472020, Thèses de médecine.
- **Scott, P. M. (1998).** Industrial and farm detoxification processes for mycotoxins. Revue de Medecine Veterinaire (France).
- **Semassa, A. J., Padonou, S. W., Anihouvi, V. B., Akissoé, N. H., Adjanohoun, A., & Baba-Moussa, L. (2016).** Diversité Variétale, Qualité Et Utilisation Du Maïs (Zea Mays) En Afrique De l'Ouest : Revue Critique. European Scientific Journal, 12(18).
- **Siou, D. (2013).** Développement épidémique de la fusariose des épis de blé et conséquences des interactions entre espèces du complexe fusarien (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).
- **Soltner P. (2005).** Les bases de la production végétales: La plante et son amélioration. 4èmeEd. Collection et Techniques Agricoles. 248p.
- **Tebibel N ; Bouras N ; Didi, Ould El Hadj M. (2016).** Les mycotoxines: un danger de santé public. Algerian Journal of Arid Environment "AJAE", , 6.1.
- **Valade, R., Orlando, B., Maumené, C., Laval, V., Walker, A. S., Ioos, R., ... & Gourdain, E. (2020, January).** La fusariose des épis des céréales à paille: synthèse de 10 années de recherche pour une meilleure gestion intégrée de la maladie. In Phloème 2020: biennales de l'innovation céréalière.
- **Web 1 :** <https://www.google.com/search?q=la+rouille+noire&client>
- **Web 4 :** <https://www.google.com/search?q=symptomes+de+Fusariose&client>
- **Web 2 :** <https://www.google.com/search?q=symptomes+de+septoriose&client>
- **Web 3 :** <https://www.google.com/search?q=symbtomes+de+charbon+nu&client>
- **Web5:** <https://www.cropscience.bayer.dz/fr-dz/cultures/problematique/maladies-fongiques-fusariose.html>.
- **Whitlow, L. W., & Hagler, W. M. (2001).** La contamination des aliments par les mycotoxines : Un facteur de stress additionnel pour les bovins laitiers. Le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.
- **Yiannikouris, A., & Jouany, J. P. (2002).** Les mycotoxines dans les aliments des ruminants, leur devenir et leurs effets chez l'animal.

- **Yoon, Y. H., & Baek, Y. J. (1999).** Aflatoxin binding and antimutagenic activities of *Bifidobacterium bifidum* HY strains and their genotypes. *Korean Journal of Dairy Science*, 21(4), 291-298.

تعتبر الحبوب مصدر رئيسي لتغذية الإنسان والحيوان على الصعيدين المحلي والعالمي، لذلك تحتل مكانة مركزية في النظام الزراعي. إلا أنها تواجه مشكلة تعرضها المستمر للفطريات الممرضة، بداية من نموها، نقلها، تخزينها إلى غاية وصولها إلى المستهلك. ومن بين هذه الفطريات الفيزاريوم الذي يؤثر على الغلة وصحة المحصول بسبب وجود السموم في الحبوب والتي بدورها تؤثر على صحة المستهلك. الهدف من هذه المساهمة هو تسليط الضوء على التشخيص الدقيق لهذه السموم عن طريق تطوير تقنيات الكشف المبكر والسريع و طرق مكافحتها. تعتبر مجموعة السموم (ZEA) Zéaralénone، Trichothécène (TCT) بالإضافة إلى Fumiosine (FB) من أهم السموم التي تفرزها سلالات الفيزاريوم، تعمل هذه السموم بدرجات متفاوتة الخطورة مسببة العديد من الأمراض. تتضمن السيطرة على هذه السموم إستراتيجية شاملة تهدف إلى تقليل مفعولها والحد من انتشارها، ويمكن أن تكون طرق المكافحة كيميائية، وراثية، بيولوجية أو مكافحة متكاملة.

الكلمات المفتاحية: الحبوب، الفيزاريوم، السموم الفطرية، Fumiosine Zéaralénone، Trichothécènes.

Résumé

Les céréales sont une source importante de nutrition humaine et animale. À échelle national et mondial, elles sont au cœur du système agricole. Néanmoins, il y a un problème de la contamination permanente par des champignons pathogènes, de sa croissance, son transport, son stockage jusqu'à au consommateur. Il s'agit notamment de Fusarium, qui affecte les rendements des cultures en raison de la présence de toxines dans les céréales qui à son tour affecte la santé des consommateurs. L'objectif de cette contribution est de mettre en exergue sur le diagnostic précis de ces toxines en développant des techniques de détection précoce et rapide et ainsi les méthodes de lutte. Le zéaralénone (ZEA), trichothécène (TCT) et La fumiosine (FB) sont des toxines les plus importantes excrétées par les souches fongiques de Fusarium, ces toxines fonctionnent de divers degrés dangereux et causant de nombreuses maladies. Le contrôle de ces toxines comprend une stratégie globale visant à réduire leur efficacité et leur prévalence, les méthodes de contrôle peuvent être chimiques, génétiques, ou biologiques. Finalement la méthode physique reste la plus efficace.

Mots-clés : Céréales, *Fusarium*, mycotoxines, Trichothécènes, Zéaralénone, Fumiosine.