

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة عمار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES
قسم البيولوجيا
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Sciences Biologiques

Option : Microbiologie Appliquée

Domaine : Science De La Nature Et De La Vie

THEME

**Étude Théorique Mycotoxicologique du *Triticum
aestivum* (Blè Tendre)**

Présenté par :
BELMOKHTAR Sarah

Devant le jury composé de :

Président(e) : CHAIBI Rachid professeur à l'UATL

Examineur(rice)s : BENACEUR Farouk MCA à l'UATL

Rapporteur : CHETATHA Mohamed MAA à UATL

Soutenu publiquement le:2020/2021.

Remerciements

S'il faut beaucoup de motivation , de rigueur et d'enthousiasme pour mener a bien ce mémoire,alors,ce travail de recherche a eu besoin de la contribution de plusieurs personnes,que je tiens à remercier !

Mon encadreur,**MOHAMED CHETATHA** pour tous ses précieux conseils,pour son écoute active,sa disponibilité.

J'exprime mes vifs remerciements au jury qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce modest mémoire .

Un grand merci a **Mr CHAIBI RACHIDI** le chef de Département de biologie université amar telidji laghouat.

Et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicace

Ce travail est dédié à mon père **BELMOKHTAR OMAR**, décédé trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme.


Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde .

Il est naturel que ma pensée la plus forte aille vers ma mère **OULAD TAHER FATIMA**, à qui je dois la vie et une part essentielle de ma personnalité. Qu'elle sache que l'amour qu'elle me donne continue à m'animer et me permet d'envisager l'avenir comme un défi.

Je tiens à présenter mes reconnaissances et mes remerciements à mon Mari Qui n'a jamais cessé de me soutenir pour que je puisse finir mes études et avoir une bonne formation et surtout être la meilleure et à qui je voudrais exprimer mes affections et mes gratitude.

Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui me sont chères, en particulier mes frères: **ABDELKADER, MOUSSA AHMED, YUCEF** et mes sœurs : **ASMA, KHADIDJA, ISRAA**

Merci aussi à tous ceux qui ont consacré du temps, de l'énergie et de la patience.



sommaire

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace	II
Table des Matières	III
Liste des tableaux	IV
Liste des Figures	V
ملخص.....	1
Rèsumè	1
Abstract.....	1
Liste des Abrèviation	2
Introduction Gènerele	4
L’histoire du Grain de Blè	6
Chapitre I : LE blè	9
-Origine de La Farine	9
-Le blè dans le Monde.....	9
-Le blè en Algerie	11
-Comparaison entre le blè dur et le blè tendre.....	12
-La transformation du blè tendre en farine : entre procédé et qualité microbiologique..	20
-Composition de la farine	20
-Différents types de farine	21
Chapitre II : Moisissures et mycotoxines contaminant la farine... 23	
-Contamination microbiologique de la farine	23
-Origine des contaminations	25

-Les moisissures dans la farine	27
-Principales moisissures toxigènes présentes dans la farine	27
-Les mycotoxines dans la farine.....	32
-Origines endogènes et exogènes des spores	34
- Spores endogènes	34
- Spores exogènes.....	34
- La flore microbienne des aliments	34
-	
Les psychrophiles et les psychrotrophes	37
Les mésophiles	38
Les thermophiles	38
Les principales mycotoxines contaminant la farine	38
Evolution de la mycoflore.....	44
Conséquences de la présence de moisissures dans les farines	45

Chapitre III : Traitement et analyse du blé tendre et de la farine 47

Stratégies de contrôle après la récolte du blé tendre.....	48
Caractéristiques de la farine	49
1- Caractéristiques organoleptiques.....	49
2-Caractéristiques physico-chimiques	51
3- Caractéristiques biochimiques	55
4-Caractéristiques technologiques.....	57
5-Caractéristiques microbiologiques.....	59
Détection des moisissures dans un échantillon de farine	63

Réglementation de l'OTA.....	65
Dosage de l'AFB1 par HPLC-FLD	66
DISCUSSION	67
Normes alimentaires internationales pour la farine de blé.....	67
1- Facteurs de qualité – critères généraux.....	67
2- Facteurs de qualité – critères spécifiques.....	68
Normes alimentaires nationales pour la farine de blé tendre	68
Approches de décontamination	69
Conclusion générale	72
Références bibliographiques	74

Liste des tableaux

Les tableaux	page
Tableau N°1 : Classification du blé dur et tendre	14
Tableau N°2 : Composition de la farine	21
Tableau N°3 : Flore microbienne du blé	26
Tableau N°4 : Teneurs maximales en aflatoxines exprimés en $\mu\text{g}/\text{kg}$	42
Tableau N°5 : Structures chimiques des principales Fumonisines	44
Tableau N°6 : Composition chimique des farines en fonction des taux d'extraction	52
Tableau N°7 : Composition chimique des farines en fonction des taux d'extraction	52
Tableau N°8 : Caractéristiques des milieux spécifiques pour la détermination des genres <i>Aspergillus</i> et <i>Penicillium</i>	63
Tableau N°9 : Teneurs maximales en ochratoxine A dans les céréales et le blé exprimées en $\mu\text{g}/\text{kg}$	65
Tableau N°10 : Critères spécifiques des facteurs de qualité de la farine de blé tendre	68
Tableau N°11 : Méthodes de lutte contre la contamination	70

Liste des figures

Les figures	page
Figure 01 : Carte géographique de production de blé dans le monde	10
Figure 02 : les 10 premiers pays producteurs du blé dans le monde	11
Figure 03 : Moyenne de superficie récoltée et production de blé en Algérie	12
Figure 04 : Schéma d'un grain de blé en coupe longitudinale	13
Figure 05 : Cycle de développement de blé	16
Figure 06 : La morphologie du blé tendre	17
Figure 07 : Stroma <i>Claviceps purpurea</i> : champignon en train de faire les spores	24
Figure 08 : Les différentes catégories de sclérotés	24
Figure 09 : (a) Colonies de <i>Fusarium acuminatum</i> ; (b, c) macroconidies	29
Figure 10 : (a) Colonies de <i>Penicillium citreonigrum</i> ; (b, c, d, e) pénicilles ; (f) conidies	30
Figure 11 : (a) Colonies d' <i>Aspergillus flavus</i> ; (b, c) têtes ; (d) conidies	31
Figure 12 : Structure chimique de base des trichothécènes	39
Figure 13 : Structures chimiques des aflatoxines	41
Figure 14 : Structure chimique générale des Fumonisines	43
Figure 15 : Essai au toucher de la farine de blé tendre	50
Figure 16 : Schéma d'un exemple d'une méthode d'analyse quantitative des moisissures d'une farine	64

ملخص

يُعد التريتيكوم استيفوم أو المعروف أكثر باسم "القمح اللين" أكثر أنواع الحبوب استهلاكاً في العالم، وخاصة في الجزائر، حيث يُقدر متوسط إنتاجه بأكثر من 5 ملايين كنتال سنوياً. ويظل تحويل القمح اللين الى طحين عملية حساسة للملوثات الميكروبيولوجية مثل « *Aspergillus, Penicillium, Fusarium* » وما إلى ذلك، والتي تنتج بدورها الميكوتوكسينات مثل الأفلاتوكسينات والأوكريتوكسينات، التي يمكن أن تتسبب في تسمم المستهلك. ولهذا الغرض، يتم الأخذ باستراتيجيات المكافحة "العضوية، الفيزيوكيميائية، الكيموحيوية، الميكروبيولوجية والتكنولوجية" بعد حصاد القمح اللين إلى أن يتم تحويله الى طحين لمنع أي خطر يتسبب في تدهور نوعية المنتج او صحة المستهلك إزاء المعايير المقررة من طرف منظمة الصحة العالمية ومنظمة الأغذية والزراعة.

RESUME

Le *Triticum aestivum* ou plus communément appelé « blé tendre » est l'espèce de céréales la plus consommée dans le monde notamment en Algérie, avec une production moyenne estimée à plus de 5 millions de quintaux par an. La transformation du blé tendre en farine reste un procédé sensible aux contaminants microbiologiques tels que les moisissures « *Aspergillus, Penicillium, Fusarium* » qui engendrent à leur tour des mycotoxines comme les aflatoxines et les ochratoxines qui peuvent provoquer une intoxication chez le consommateur. Pour cela, des stratégies de contrôle préventives « organoleptique, physico-chimique, biochimique, microbiologique et technologique » après la récolte du blé tendre jusqu'à sa transformation en farine sont instaurées afin de prévenir tout risque lié à l'altération de la qualité du produit ainsi qu'à la sécurité du consommateur vis-à-vis des normes instaurées telles que l'OMS et la FAO.

ABSTRACT

Triticum aestivum or more commonly known as "soft wheat" is the most widely consumed cereal species in the world especially in Algeria, with an estimated average production of more than 5 million quintals per year. The processing of common wheat into flour remains a sensitive process to microbiological contaminants such as *Aspergillus, Penicillium, Fusarium*. which in turn produce mycotoxins such as aflatoxins and ochratoxins, which can cause consumer's intoxication. For this, preventive control strategies «organoleptic, physicochemical, biochemical, microbiological and technological» after the harvest of the common wheat until it is processed into flour are introduced in order to prevent any risk related to the deterioration of the quality of the product and to the safety of the consumer vis-à-vis the established standards such as the WHO and the FAO.

Liste des abréviations

AF : Aflatoxines

AFB1 : Aflatoxine B1

A_w : Activity of water (Activité de l'eau)

CO₂ : Dioxyde de Carbone

F : Fumonisines

FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)

Fe : Fer

FLD : Fluorimetric Detection

HPLC : High Performance Liquid Chromatography

HR : Humidité relative

K : Potassium

Kg : Kilogramme

Mg : Magnésium

Mn : Manganèse

Mt : Millions de tonnes

O₂ : Dioxygène

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OTA : Ochratoxine A

OTB : Ochratoxine B

OTC : Ochratoxine C

P : Phosphore

pH : Potentiel d'Hydrogène

UV : Ultraviolet

°C : Degré Celsius

µm : Micromètre

Introduction

Introduction générale:

Environ 70 % des surfaces ensemencées sont consacrées à la culture des céréales. Celles-ci constituent toujours la principale denrée car elles peuvent croître dans les sols et sous les climats les plus variés. De plus, elles peuvent être entreposées pendant de longues périodes et transportées de manière économique sur de longues distances sans occuper beaucoup d'espace. Enfin, elles peuvent être utilisées à leur nature ou être rapidement transformées pour l'alimentation humaine (Boudreau A., Ménard G., 1992).

Les céréales sont des espèces généralement cultivées pour leur grain, dont l'albumen amylicé, réduit en farine, est consommable par l'homme et/ou par les animaux domestiques (NEDJAH I., 2015).

Cultivé depuis la préhistoire, le blé a joué un rôle clé dans la révolution agricole du néolithique. En fait, la découverte des premiers signes des espèces de blé, date d'un peu de moins de 8000 ans avant Jésus-Christ (Loucif L., 2015).

Aujourd'hui dans le monde, le blé dur et le blé tendre sont les céréales les plus consommées et cultivées pour l'alimentation humaine (METIDJA H. I., 2020).

La demande en blé est présagée à une forte augmentation avec l'accroissement de la population mondiale estimée d'atteindre 9 milliards d'individus en 2050. Ainsi, la production du blé aura un impact crucial sur la sécurité alimentaire et l'économie mondiale dans les prochaines décennies (Hubert et al., 2010).

La filière céréalière constitue l'une des bases importantes de l'industrie agro-alimentaire en Algérie. Importance qui résulte, notamment, de la place prépondérante qu'occupent les céréales et leurs dérivés dans l'alimentation humaine, notamment la semoule (couscous et pâtes) et la farine (pain), comme dans l'alimentation animale (son de blé et farine basse) (Kellou R., 2008).

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 (Alban Gauthier, 2016).

Les aspects qualitatifs et sanitaires sont très importants. Un des critères importants de la qualité sanitaire des céréales et leurs dérivés est la contamination en mycotoxines. La présence de moisissures et de toxines dans les aliments est devenue un sujet de préoccupation pour les professionnels de la santé, ainsi que pour le commerce mondial (NGUYEN MINH TRI, 2007).

La contamination des aliments par les mycotoxines représente un risque élevé pour la santé humaine et animale. Les mycotoxines peuvent causer une intoxication aiguë ou chronique et des dommages aux humains et aux animaux après l'ingestion d'aliments contaminés (Amar Riba et al., 2010).

Il a été signalé que 25 à 40 % des céréales consommées dans le monde sont contaminées par ces composés toxiques. L'ochratoxine A (OTA) est l'une des mycotoxines les plus importantes, avec les aflatoxines (AF) et les fumonisines (F). L'OTA peut être très stable à la transformation des aliments, elle peut donc être trouvée dans les produits finaux (Amar Riba et al., 2008, 2010, 2018).

Dans le respect de la réglementation et des bonnes pratiques agroindustrielles, la farine est généralement considérée comme un produit microbiologiquement sain. Sous bonnes conditions de stockage ce produit de faible taux d'humidité ne s'apprête pas au développement des micro-organismes (Naoufal Tahani et al., 2008).

Ce mémoire s'articule en trois chapitres. Nous allons donc débiter ce travail par le chapitre I qui consistera à présenter la place qu'occupe le blé dans le monde notamment en Algérie. Notre étude sera ensuite orientée vers le blé tendre et sa morphologie ainsi que la structure et la composition de son grain. Pour terminer ce chapitre nous allons mettre en évidence la transformation du blé tendre en farine.

Le chapitre II est réservé à la contamination microbiologique de la farine, ses origines et les principales moisissures toxigènes responsables de cette contamination. Ainsi, dans un deuxième lieu, nous allons nous intéresser aux mycotoxines dans la farine, leur détection et l'approche de décontamination.

Le 3^{ème} chapitre a pour objectif l'appréciation de la qualité technologique des farines de blé tendre et l'étude de leurs caractères physico-chimiques, technologiques et rhéologiques par le biais de différentes techniques d'analyse.

L'histoire du grain de blé:

Céréale appartenant au genre *Triticum*, le blé a suivi le processus naturel de l'évolution. Cette plante annuelle de la famille des graminées existait à l'état sauvage il y a de cela des siècles, probablement en Asie Mineure (ou Anatolie), dans les régions correspondant à la Syrie et au nord de la Palestine actuelles. Un premier croisement accidentel, survenu il y a 10 000 ans, entre un blé sauvage (*Triticum monococcum*) et une herbe sauvage (*Ægilops speltoides*) a donné naissance à un blé dur (*Triticum turgidum L.*). Les agriculteurs de l'Abyssinie (l'Éthiopie aujourd'hui) cultivaient deux espèces de blé (*Triticum monococcum* et *Triticum turgidum L.*) où poussait une autre graminée sauvage (*Triticum tauschii*). Les différentes sortes de blé auraient été ainsi transportées par l'homme dans cette région. Mille ans plus tard, une seconde hybridation accidentelle donna naissance à une nouvelle espèce : le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) (Boudreau A., Ménard G., 1992).

D'autres situent l'origine de cette espèce dans la région afghano-indienne, en Asie centrale. En régime de domestication, ce serait à partir des deux espèces *Triticum turgidum L.* et *Triticum aestivum L.* que seraient nées les nombreuses variétés, très différentes, de blé dur (*durum*) et de blés tendres (*hard* et *soft*). Des banques de blé sont d'ailleurs maintenues à travers le monde pour assurer la survie des variétés en cas de catastrophe et pour permettre aux sélectionneurs d'y puiser des renseignements génétiques précieux (Boudreau A., Ménard G., 1992).

Au Canada, la culture du blé a été introduite par les colons français en 1605. Les premières grandes vagues d'immigrants européens vers l'Ouest canadien ont déferlé dans les années 1880 et au début du XX^{ème} siècle, semant des graines en provenance de leurs terres natales. Une variété européenne de blé s'appelait la *Galician*, nommée d'après l'ancienne province ukrainienne de Galicie, et la meilleure variété nord-américaine était le blé *Red fife*, génétiquement identique à la *Galician*. Leur principale lacune était la longue durée de leur cycle de croissance. Elles nécessitaient, en effet, plus de temps pour murir que n'offrait le plus souvent le rigoureux climat de la Prairie canadienne (Boudreau A., Ménard G., 1992).

En plus d'une quinzaine d'espèces de blé sauvage cultivées dans le monde, il existe trois espèces domestiques largement cultivées dans l'hémisphère Nord : le blé dur dit ambré (*durum*), le blé tendre vitreux dit de force (*hard*) et le blé tendre dit faible, mou ou amidonné (*soft*). Ces trois espèces sont utilisées pour la fabrication de la semoule et de la farine dans l'alimentation humaine (Boudreau A., Ménard G., 1992).

La terminologie européenne distingue le blé dur (*Triticum turgidum L.*) et les blés tendres (*Triticum aestivum L.*). Elle confond dans les blés tendres le blé tendre vitreux (blé de boulangerie) et le blé tendre (blé de biscuiterie-pâtisserie) (Boudreau A., Ménard G., 1992).

Dans les fermes expérimentales du ministère de l'Agriculture du Canada à Agassiz (Manitoba), à Ottawa (Ontario) et à Indian Head (Saskatchewan), les travaux de recherche des frères Charles et Percy Saunders ont mené, en 1911, à la sélection de la première variété précoce de blé tendre vitreux (*hard*), le Marquis, qui a permis aux agriculteurs canadiens d'accéder aux grands marchés d'exportation. De plus, Charles Saunders fut le premier scientifique à établir de nouvelles normes de sélection dans un programme en amélioration des céréales (Boudreau A., Ménard G., 1992).

Chapitre I : Le blé

Chapitre I : Le blé

1- Introduction:

En tant que sources énergétiques et protéiques, les céréales, originaires d'Orient, demeurent la principale nourriture de la planète. L'homme désignait autrefois sous le vocable de « blé » toute céréale comestible. Cueillies et consommées d'abord sous forme de grains entiers, les céréales, notamment le blé, l'orge et le riz, furent progressivement exploitées en culture afin d'être utilisées sous forme de grains broyés pour l'alimentation humaine (Boudreau A., Ménard G., 1992). En effet, l'histoire de l'homme est intimement liée à celle des céréales qu'il a très tôt appris à domestiquer, cultiver et sélectionner (BOURAK K., 2018).

Le blé occupe la première place dans la production mondiale de céréales et la deuxième après le riz comme source d'alimentation pour les populations humaines, il assure 15 % de leurs besoins énergétiques (METIDJA H. I., 2020)

Dans ce présent chapitre, nous allons nous intéresser à un seul type de céréales : le blé et plus précisément le blé tendre, l'un des céréales les plus consommées dans le monde notamment en Algérie.

2- Origine de la farine:

La meunerie constitue l'une des piliers de l'industrie agro-alimentaire en Algérie. La transformation concerne essentiellement la trituration des blés en vue de la production de farine (Kellou R., 2008).

La farine de blé tendre ou froment est le produit obtenu à partir des grains de blé tendre (*Triticum aestivum*). La dénomination de la farine, désigne la farine de blé tendre tritium exclusivement la farine. Ce produit que l'on obtient avec la mouture de l'amande du grain de froment que l'on a broyée et nettoyée. Le blé tendre est cultivé pour faire de la farine panifiable utilisée pour fabriquer le pain (Kellou R., 2008) (ABDANI I., BAKHTI A., 2017).

3- Le blé dans le monde:

Le blé est la céréale la plus populaire en Europe, en Amérique du Nord, en Afrique du Nord et dans une partie de l'Asie (Inde, Chine et Japon) (Boudreau A., Ménard G., 1992). La production mondiale actuelle s'élève à environ 766 millions de tonnes (Mt) de blé récoltée sur une superficie de plus de 215 millions d'hectares (FAO, 2021).

La figure I.1 : représente la carte du monde relative à la production de blé par État, exprimée en tonnes. Le blé est cultivé sur plus de terres que toute autre culture vivrière avec 220,4 millions d’hectares en 2014. La production mondiale de blé est de 735 Mt en 2018, contre 584 Mt en 2000, 440 Mt en 1980 et 222 Mt en 1961.

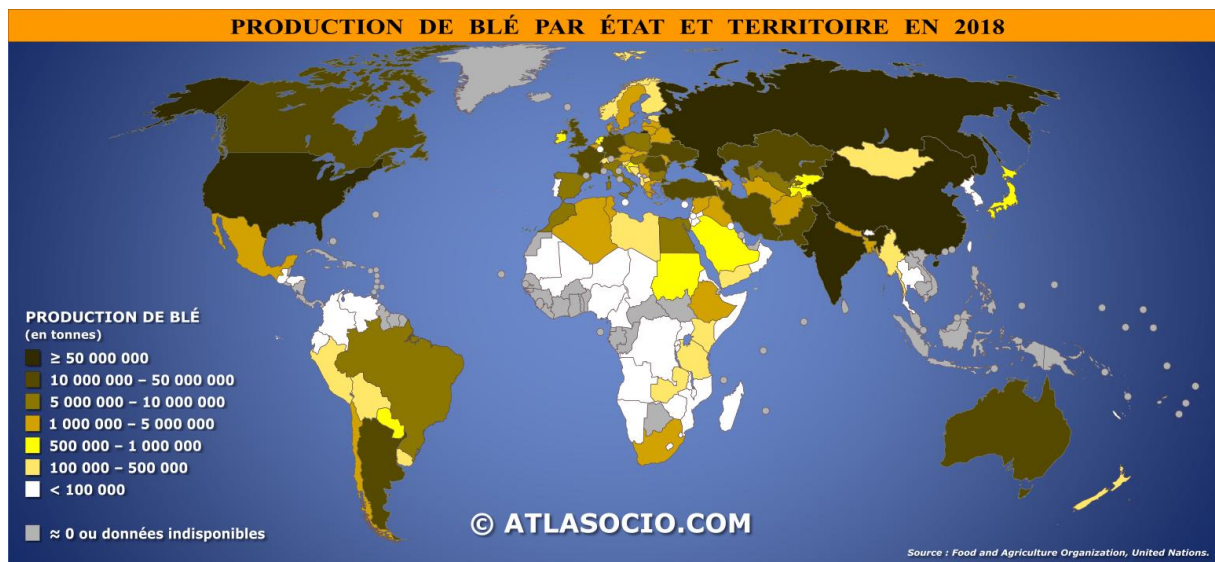


Figure I.1 : Carte géographique de production de blé dans le monde (L’atlas sociologique mondial, 2021)

D’après les statistiques de l’Organisation des Nations Unies pour l’alimentation et l’agriculture (FAOSTAT), la moyenne annuelle de la production mondiale de blé entre 2009 et 2019 atteignait les 717 Mt. Les plus importants producteurs étaient la Chine, l’Inde et la Fédération de Russie produisant environ 38 % du blé de la planète. La figure I.2 présente le classement des 10 premiers pays producteurs de blé dans le monde entre 2009 et 2019.

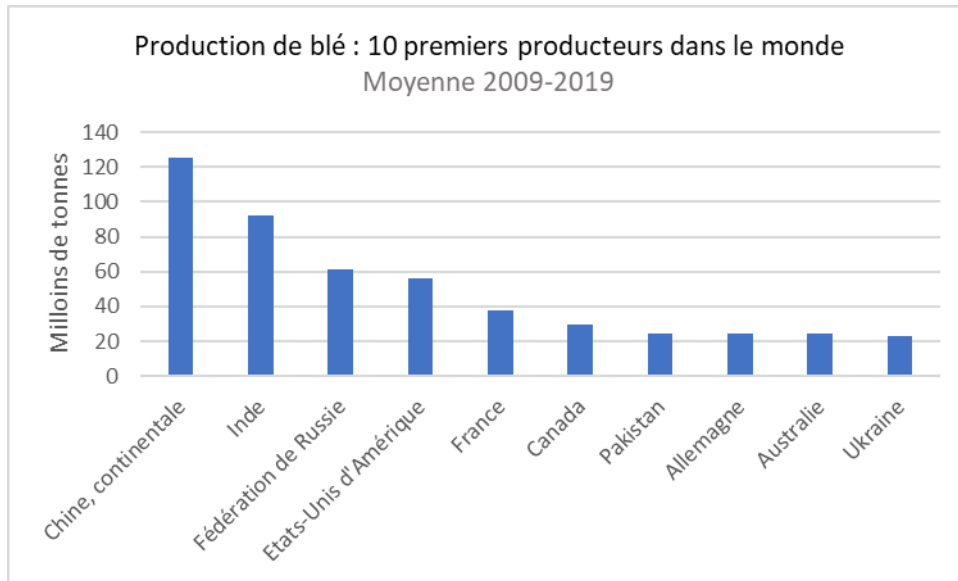


Figure I.2 : les 10 premiers pays producteurs du blé dans le monde (2009-2019) (FAO, 2021)

En 2019, la récolte mondiale de blé dur de 35,6 millions de tonnes a été marquée par une forte baisse pour la plupart des pays producteurs et fournisseurs du marché mondial (excepté le Mexique) alors que la production des principaux pays consommateurs et acheteurs du marché a indiqué une hausse globale (FranceAgrimer, 2020).

La production de blé dur en 2019 d'une partie des pays du Maghreb a une nouvelle fois confirmé une forte progression, notamment pour l'Algérie dont la récolte a atteint un niveau record avec 3,4 millions de tonnes. La Tunisie qui a bénéficié de bonnes précipitations à des périodes favorables au cours du cycle de culture a vu ses rendements atteindre un niveau record lui permettant ainsi d'enregistrer une récolte autour de 1,2 Mt. A contrario, parmi les pays producteurs de blé dur de l'Afrique du Nord, le Maroc a vu sa production chuter de 50 %, avec 1,3 millions de tonnes, en raison d'une baisse des surfaces cumulée à un manque de précipitations (FranceAgrimer, 2020).

4- Le blé en Algérie:

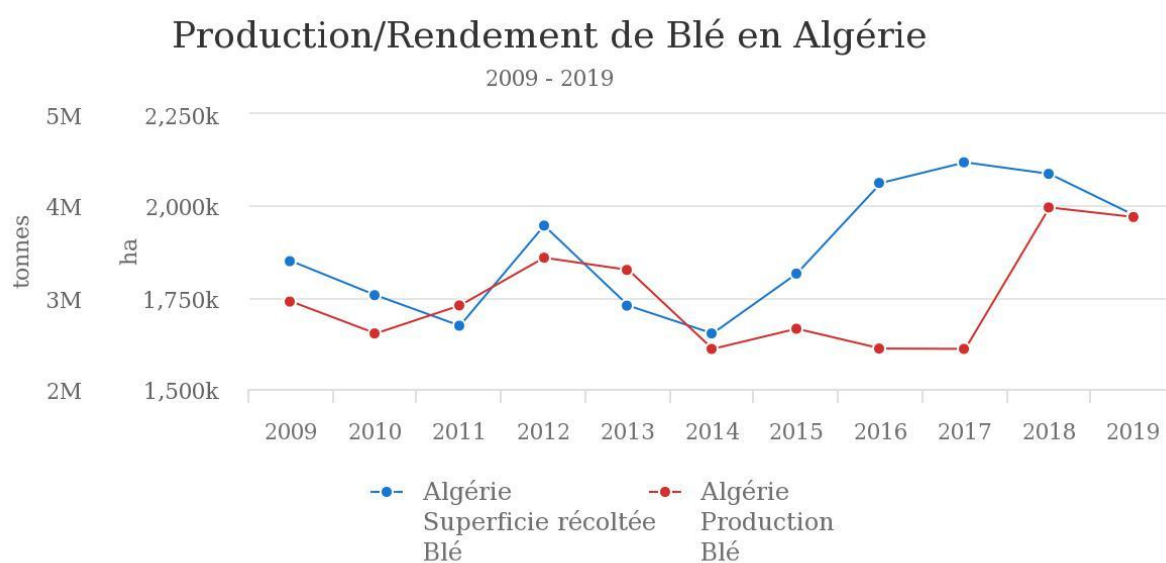
Les céréales et leurs dérivés constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien. Effectivement, les céréales constituent la base du modèle de consommation alimentaire dans ce pays, comme dans la plupart des pays méditerranéens. 54 % des apports énergétiques et 62 % des apports protéiques journaliers provenaient de ces produits en 2003 et le blé représentait 88 % des céréales consommées. L'Algérie se situe ainsi au premier rang mondial pour la consommation de blé avec plus de 200 kg par habitant et par an en 2003 (Kellou R., 2008).

D'après les statistiques agricoles du ministère de l'agriculture et de développement rural, La superficie ensemencée en céréales entre 2010 et 2017 a atteint en moyenne plus de 3 millions d'hectares, en évolution de 6 % par rapport à la période précédente (2000-2009) (MADR, 2018).

La production des céréales au cours de la période 2010-2017 est estimée à 4.12 millions de tonnes en moyenne, soit un accroissement de 26 % par rapport à la décennie 2000-2009 où la production est estimée en moyenne à 3.26 Mt (MADR, 2018).

Cette production est constituée essentiellement de blé dur représentant 51 % de l'ensemble des productions de céréales entre 2010 et 2017. Parmi toutes les céréales, le blé dur est l'un des aliments de base pour la majeure partie de la population algérienne (CHETMI Dalel, 2009).

Pour mieux illustrer ces chiffres, sont présentées dans la figure I.3 les moyennes de superficie



récoltée et de production de blé en Algérie entre 2010 et 2019 déclarées par la FAO.

Figure I.3 : Moyenne de superficie récoltée et production de blé en Algérie 2009-2019 (FAO, 2021)

5- Comparaison entre le blé dur et le blé tendre:

Le blé est une plante herbacée monocotylédone appartenant au groupe des céréales à paille. C'est une céréale dont le grain est un fruit sec indéhiscant appelé caryopse constitué d'une graine et de téguments (Feillet Pierre, 2000).

Le grain de blé, comme montré sur la figure I.4, est constitué de 3 grandes parties : le germe, l'albumen et les enveloppes. Ces dernières n'adhèrent pas au grain et sont éliminées lors du battage (Clément Debiton, 2010) (Surget A., Barron, C., 2005).

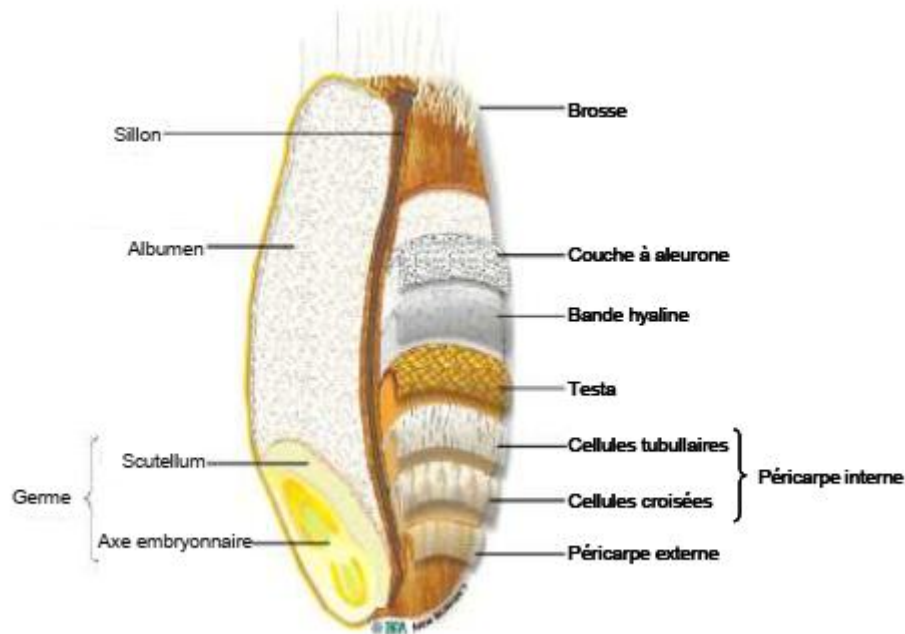


Figure I.4 : Schéma d'un grain de blé en coupe longitudinale (Surget A., Barron, C., 2005)

On distingue, en référence à la terminologie européenne, deux espèces de blé : le blé tendre et le blé dur. Ces deux espèces, se différencient par la friabilité de l'amande. L'amande du blé tendre est blanche et friable, tandis que celle du blé dur est jaune et plus dure. Au moulin, les graines de blé tendre sont broyées en farine, celles-ci servent à la fabrication de pains, de biscuits, de pâtisseries, de pizzas et de viennoiseries. A la semoulerie, les grains de blé dur sont broyés en semoules (NEDJAH I., 2015).

Le blé dur est l'une des principales céréales. Cette plante herbacée annuelle qui produit le grain dont on tire la farine pour faire notamment le pain et les pâtes alimentaires constitue la base des ressources alimentaires de l'humanité (METIDJA H. I., 2020).

Également, Le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) compte parmi les espèces les plus anciennement cultivées et constitue la base de l'alimentation d'une grande partie de l'humanité, d'où son importance économique (BOURAK K., 2018).

La classification à laquelle obéissent le blé dur et tendre est exposée dans le tableau I.1 montrant ainsi les ressemblances et les différences entre ces deux espèces.

Tableau I.1 : Classification du blé dur et tendre (Feillet Pierre, 2000)

	Blé dur	Blé tendre
Règne	<i>Plantae</i>	<i>Plantae</i>
Classe	<i>Monocotylédones</i>	<i>Liliopsoda</i>
Sous classe	<i>Commeliniflorales</i>	<i>Commelinidae</i>
Ordre	<i>Poale</i>	<i>Poale</i>
Famille	<i>Graminaceae</i>	<i>Poaceae</i>
Genre	<i>Triticum</i>	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticumdurum.Desf</i>	<i>Triticum aestivum L.</i>

5-1 Le blé tendre:

Le blé tendre, *Triticum aestivum*, est un allohexaploïde avec trois génomes A, B et D provenant d'espèces diploïdes différentes. L'identification de ces espèces a été rendue possible par l'étude d'hybrides entre les différents blés puis entre ces blés et des espèces voisines appartenant au genre *Aegilops* (BOURAK K., 2018).

Depuis une dizaine d'années, la production mondiale de blé tendre est d'environ 690 Mt/an en moyenne sur dix ans, une culture qui a progressé au cours de cette période (Yannick Carel, 2017).

Le blé tendre est l'espèce la plus consommée par une grande partie de la population mondiale. L'Afrique du Nord et particulièrement l'Algérie consomme les plus grandes quantités de pain au monde.

En Algérie, la production moyenne de blé tendre au cours de la période 2000-2017 a été estimée à plus de 5 millions de quintaux (MADR, 2018).

5-2 La morphologie du blé tendre:

Les graines de blé sont des fruits appelés caryopses. Elles ont une forme ovoïde, possédant sur l'une de leurs faces une cavité longitudinale (le sillon) et à l'extrémité opposée de l'embryon des touffes de poils (la brosse) (METIDJA H. I., 2020).

Morphologiquement parlant, le blé est une graminée constituée de trois parties :

5-2-1 Un appareil végétatif herbacé:

Cet appareil comprend :

5-2-1 a) Un système racinaire fasciculé assez développé, si on le compare à celui du maïs. Mais la profondeur de l'enracinement et le rendement qui en résulte sont souvent liés à la profondeur du plan d'eau.

5-2-1 b) Une tige creuse et des feuilles engainantes La tige creuse ou chaume, dont les entre-nœuds ne se sont allongés qu'à la montaison, porte des feuilles engainantes à nervures parallèles, issues chacune d'un nœud (SOLTNER Dominique, 2005).

5-2-2 Une inflorescence composée d'épillets:

Le rachis, ou axe de l'épi, porte de 15 à 25 épillets constitués chacun de 3 à 4 fleurs. La disposition de celles-ci fait ressortir une caractéristique d'une grande importance : le blé est une plante AUTOGAME ou à autofécondation, c'est-à-dire que la fécondation a lieu à l'intérieur des glumelles, avant que les étamines n'apparaissent à l'extérieur (SOLTNER Dominique, 2005).

5-2-3 Un fruit sec à la fois graine et fruit : le caryopse

Les fruits de toutes les céréales sont des caryopses, ou fruits secs indéhiscent dont les parois sont soudées à celles de la graine. Le caryopse des céréales est nu ou vêtu selon que les glumelles adhèrent ou non au caryopse (SOLTNER Dominique, 2005).

La figure I.5 montre dans le détail le cycle de développement du blé passant de sa germination jusqu'à l'obtention d'un grain de blé.

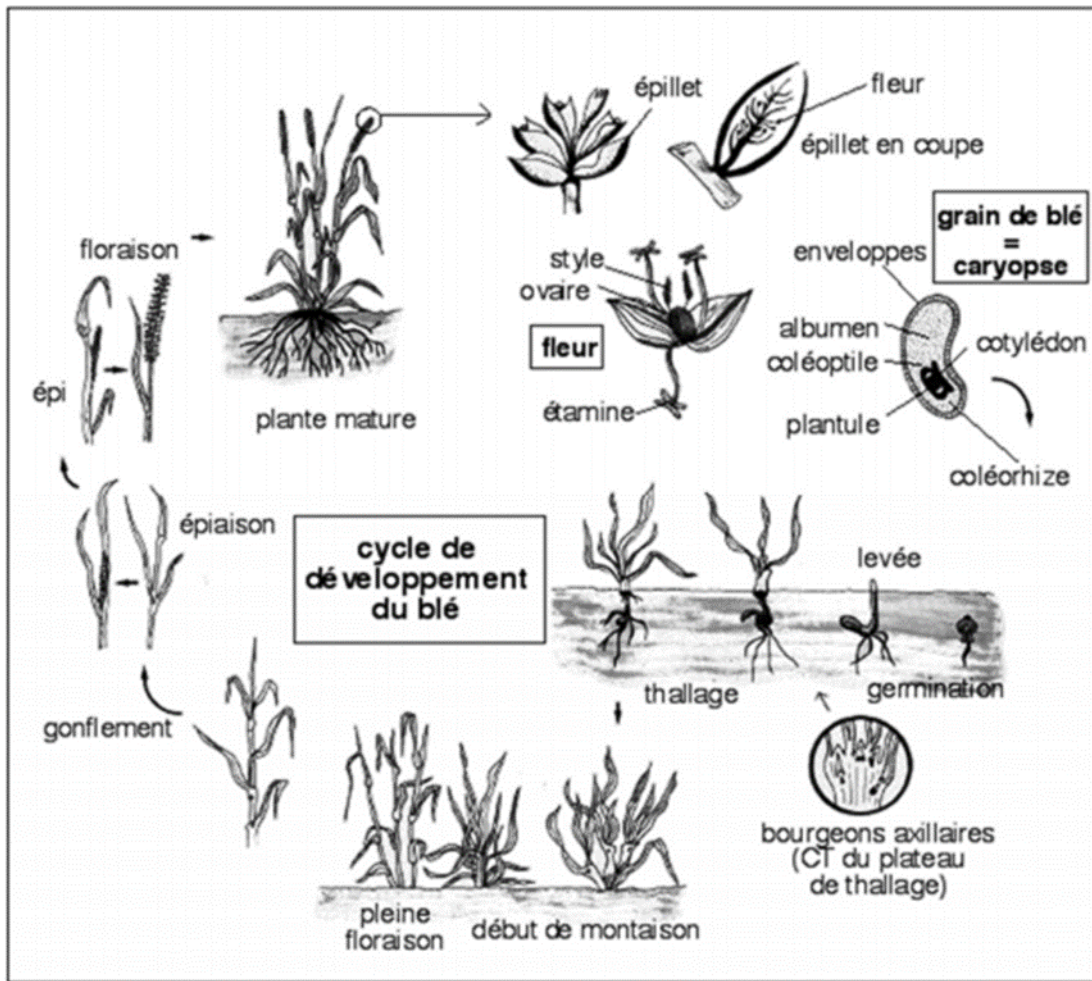


Figure 1.5 : Cycle de développement de blé (Soltner Dominique ,2005)

La figure I.6 est une illustration détaillée de la structure morphologique de chaque partie d'une plante de blé tendre.(Clément Debiton,2010)

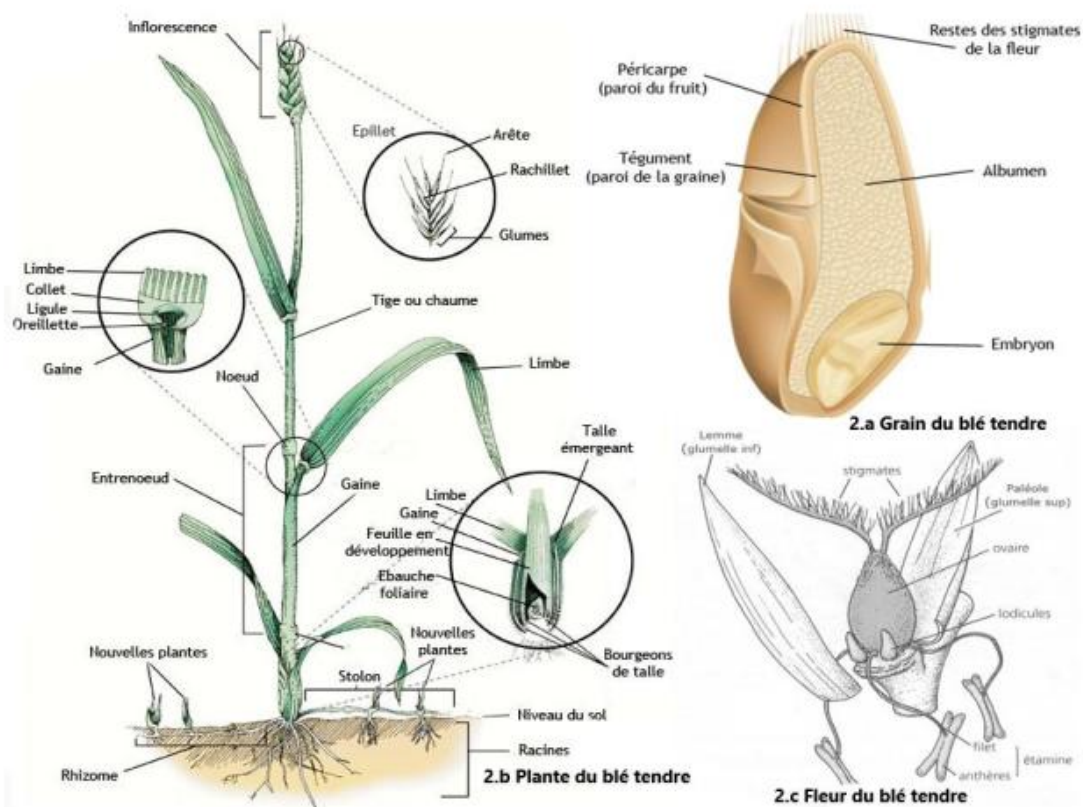


Figure I.6 : La morphologie du blé tendre (Clément Dton,2010)

6- Structure et composition du grain de blé tendre:

Le grain de blé est constitué majoritairement d'amidon qui représente environ 70 % de la matière sèche du grain et qui est situé dans l'albumen. Les protéines représentent entre 10 et 15 % de la matière sèche et se retrouvent dans tous les tissus du grain de blé avec une concentration plus importante dans le germe et la couche à aleurone. Les pentosanes (polysaccharides non amylacés) représentent quant à eux entre 2 et 3 % de la matière sèche et sont les principaux constituants des parois cellulaires de l'albumen (70 à 80 %) (Clément Debiton, 2010).

De la surface externe vers le centre du grain, on distingue l'enveloppe du fruit ou péricarpe, puis l'enveloppe de la graine, ou testa, et enfin à l'intérieur de la graine, la bande hyaline, l'albumen et le germe. Chacun de ces tissus possède une structure et une composition particulières qu'il est intéressant de détailler (Surget A., Barron, C., 2005).

6-1 Les enveloppes et la couche à aleurone:

Les enveloppes représentent 13 à 17 % du poids du grain de blé. Elles sont constituées de quatre tissus : le péricarpe externe, le péricarpe interne, la testa et la couche nucellaire ou bande hyaline (qui correspond à l'épiderme du nucelle). Ces enveloppes et la couche à aleurone sont composées principalement de polysaccharides (arabinoxylanes, xyloglucanes et cellulose) mais aussi d'acides phénoliques, lignine et de protéines (principalement albumines globulines localisées dans la couche à aleurone) (Surget A., Barron, C., 2005) (Clément Debiton, 2010) (KERMICHE Meryem, 2013).

Le péricarpe externe d'une épaisseur de 15-30 μm correspond à l'épicarpe et est constitué de deux tissus composés de cellules mortes : l'épiderme et l'hypoderme. L'épiderme est constitué de cellules allongées mesurant 80 à 300 μm et disposées selon l'axe embryonnaire. L'hypoderme possède la même structure que l'épiderme et lui est fortement adhérent. Le péricarpe externe est constitué de 45 % d'arabinoxylane, 25 % de glucose, 10 % de lignine et 6-7 % de protéines (Clément Debiton, 2010) (Surget A., Barron, C., 2005).

Le péricarpe interne correspond à l'endocarpe et au mésocarpe, respectivement constitués de cellules tubulaires et de cellules croisées. Les cellules croisées sont perpendiculaires à l'axe longitudinal du grain tandis que les cellules tubulaires lui sont parallèles. Les cellules croisées sont de tailles variables mesurant en moyenne 150 μm de longueur sur 20 μm de largeur (Clément Debiton, 2010) (Surget A., Barron, C., 2005).

La testa correspond au spermoderme. Sa face interne repose sur la cuticule de la couche hyaline. Elle est constituée de deux cuticules compressées riches en lipides et composées de cellules allongées mesurant entre 120 et 190 μm de longueur et 20 μm de largeur qui fusionnent avec un film pigmentaire. Les axes des cellules de ces deux couches sont perpendiculaires ; l'un parallèle au sillon, l'autre perpendiculaire à celui-ci. La testa est décrite comme très hydrophobe (Clément Debiton, 2010) (Surget A., Barron, C., 2005).

La couche nucellaire ou bande hyaline correspond au périsperme. Son épaisseur est d'environ 20 μm . Elle est constituée d'une assise cellulaire tassée due au remplissage de l'albumen amylicé et au développement de l'embryon. Elle est composée de cellules de taille comprise entre 30 et 200 μm de longueur et 15 à 40 μm de largeur. Cette couche est tapissée d'une fine cuticule qui la relie à la couche à aleurone aussi appelée couche du lysat nucellaire.

Cette bande hyaline est très hydrophobe et semble avoir un rôle important dans la circulation de l'eau entre l'intérieur et l'extérieur de la graine (Clément Debiton, 2010) (Surget A., Barron, C., 2005).

Une seule couche à aleurone entoure l'albumen amylicé chez le blé. Elle est, avec le germe, la seule partie du grain constituée de cellules vivantes. Les cellules de la couche à aleurone sont de forme polygonale et mesurent approximativement 65 µm. Elles possèdent de gros noyaux, des parois épaisses (jusqu'à 8 µm) et sont riches en vitamines (B1, B2, B3, B6, B9 et E) et en minéraux (P, K, Mg, Mn et Fe). La couche à aleurone par sa richesse en métabolites a un rôle nourricier et par sa structure un rôle de protection (McKevith, 2004) (Clément Debiton, 2010) (Surget A., Barron, C., 2005).

6-2 Le germe:

Le germe provient de la fusion des gamètes mâles et femelles. Il est constitué d'une part, de l'axe embryonnaire qui donnera la tigelle, le mésocotyle et la radicule et d'autre part du scutellum qui donnera le cotylédon. Le germe est la partie du grain où le taux d'humidité et la concentration en lipides sont les plus importantes. Les protéines dans le germe sont des albumines et globulines et représentent environ 35 % de la matière sèche (Clément Debiton, 2010) (Surget A., Barron, C., 2005).

6-3 L'albumen:

L'albumen constitue le plus important compartiment du grain et représente environ 80 % de son poids. Il correspond au tissu de réserve. L'albumen amylicé est essentiellement constitué des granules d'amidon enchâssés dans une matrice protéique composée en grande partie de prolamines (gliadines, gluténines de hauts et faibles poids moléculaires) mais aussi d'albumines et de globulines. Ces deux familles protéiques, gluténines et gliadines, sont hydrolysées lors de la germination et du développement de la plantule par les enzymes produites dans l'embryon et la couche à aleurone. Elles constituent la source d'acides aminés nécessaires à la germination de la graine (Clément Debiton, 2010).

Les cellules de l'albumen amylicé possèdent des parois fines et peuvent être classées en trois grands groupes :

- Les cellules périphériques situées sous la couche à aleurone et mesurant 60 µm.
- Les cellules prismatiques situées sous les cellules périphériques qui mesurent entre 128-200 µm de long et 40-60 µm de large.

- Les cellules situées dans la partie centrale de l'albumen qui sont de forme arrondie ou polygonale mesurant entre 72-144 μm de long et 69-120 μm de large (Surget A., Barron, C., 2005) (Clément Debiton, 2010).

L'albumen est la partie du grain qui présente le plus d'intérêt du point de vue de l'utilisation. En effet, les protéines de réserve qui le constituent ont la capacité de former en présence d'eau des liaisons covalentes, hydrogènes et des interactions notamment de type hydrophobe aboutissant sous l'action du pétrissage à un réseau glutineux qui possède des propriétés viscoélastiques aux multiples usages (Clément Debiton, 2010).

7- La transformation du blé tendre en farine : entre procédé et qualité microbiologique:

Le processus d'écrasement de blé commence par une phase de nettoyage visant l'élimination de toutes les impuretés. Ainsi, les lots de blé reçus passent par une série de machines destinées à éliminer toutes les impuretés qui risquent d'endommager le circuit de transformation et/ou d'altérer la qualité du produit fini (Naoufal Tahani et al., 2008).

Juste avant la mouture, les lots de blé nettoyés subissent une phase de conditionnement visant l'augmentation de l'humidité des grains de blé entre 14 et 16 % dans le but d'augmenter la plasticité des enveloppes du grain, facilitant sa séparation de l'endosperme et par conséquent, optimisant l'extraction. Le blé conditionné est stocké pendant 24 à 36 heures dans des silos de blé nettoyé. Enfin, durant la phase de mouture, les grains de blé sont ouverts et l'endosperme est séparé des enveloppes externes. Les sous-produits tel que le son de blé sont éliminés par blutage et sassage. Ces opérations créent de la chaleur qui, associée au taux d'humidité du blé conditionné peut aboutir au développement des moisissures dans les conduits de transformation contaminant par conséquent le produit fini (Naoufal Tahani et al., 2008).

De ce fait, il est nécessaire de connaître le devenir d'une telle charge mycologique sur les produits dérivés telle que la farine (Naoufal Tahani et al., 2008).

8- Composition de la farine:

Examinée sous microscope, la farine apparaît principalement constituée de morceaux de cellules de l'albumen, de granules d'amidon, de protéines interstitielles, de parois cellulaires et de fragments des enveloppes du grain (Feillet Pierre, 2000).

Tableau I.2 : Composition de la farine (Feillet Pierre, 2000)

Composé	Pourcentage (%)	
Eau	16	
Matières grasses	1,20 à 1,40	
Matières minérales	0,45 à 0,60	
Sucre (Glucides)	1 à 2	
Gluten (Protides ou protéines)	8 à 12	
Amidon (Glucides)	60 à 72	
Vitamines (Taux d'extraction de 75 à 80 %)	B6	20
	Biotine	25
	B1	30
	B12	55
	E	70

9- Différents types de farine:

C'est par le poids des cendres contenu dans 100 grammes de matière sèche qu'on désigne le type de la farine par le symbole « T ». Le chiffre associé au type indique le pourcentage en gramme du résidu minéral contenu dans ces 100 grammes de farine. Il existe un certain nombre de types de farine bien déterminé :

- **T45** : Farine blanche utilisée pour la pâtisserie.
- **T55** : Farine utilisée pour le pain de campagne.
- **T65** : Farine blanche sert à préparer le pain de campagne, ou tout autre pain dit traditionnel. Généralement issue de l'agriculture biologique, cette dernière ne contient pas d'acide ascorbique (vitamine C).
- **T80** : Farine de blé bise ou semi complète utilisée couramment dans les boulangeries biologiques, sert à préparer du pain semi complet.
- **T110** : Farine complète.
- **T150** : Farine intégrale utilisée pour la fabrication du pain complet (ABDANI I., BAKHTI A., 2017).

ChapitreII :
Moisissure et mycotoxines
contaminant la farine

Chapitre II : Moisissures et mycotoxines contaminant la farine

1- Introduction:

Les mycotoxines sont des molécules toxiques issues du métabolisme secondaire de certaines espèces de moisissures qui se développent sur un aliment. Si la toxine est en quantité suffisante dans l'aliment, elle peut provoquer une intoxication chez le consommateur (NGUYEN MINH TRI, 2007).

Un grand nombre d'espèces de moisissures appartenant principalement aux trois genres très communs *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, présents dans l'air ambiant, le sol, sur les cultures, etc. sont capables, en se développant par exemple sur certains substrats tels que l'arachide, les produits céréaliers, les céréales, etc. de synthétiser et d'excréter des mycotoxines. Parmi les mycotoxines les plus couramment rencontrées, et faisant l'objet d'une surveillance régulière, sont les aflatoxines, les ochratoxines (NGUYEN MINH TRI, 2007).

2- Contamination microbiologique de la farine:

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 (Alban Gauthier, 2016).



Figure II.1: *Sclerotinia purpurea* : champignon en train de faire les spores (Alban Gauthier ;2016)



Figure II.2 : Les différentes catégories de sclérotés (Alban Gauthier,2016)

Jusqu'à récemment, on considérait généralement que les champignons ne causaient qu'une détérioration non esthétique de la nourriture, malgré le fait que *Claviceps purpurea* était lié à une maladie humaine il y a plus de 200 ans, et la toxicité aiguë des macro-champignons est connue depuis longtemps. Des scientifiques japonais ont reconnu la toxicité du riz jaune il y a 100 ans, mais 70 ans se sont écoulés avant que sa cause fongique ne soit confirmée (Pitt et al., 2009).

Sur le plan microbiologique, la flore des farines (et des blés) provient du sol, de l'air, des matériels, des locaux, des rongeurs (rats, souris), des insectes et de l'homme ; ces derniers peuvent amener dans une farine saine des germes pathogènes comme *Staphylococcus aureus* (Feillet Pierre, 2000).

3- Origine des contaminations:

Depuis le moment de leur initiation au sein de l'épi jusqu'au passage au moulin ou à l'usine, les grains de blé sont soumis à des proliférations de bactéries, de levures, de moisissures ou de parasites. Pendant la conservation, la microflore du grain à l'origine et celle des produits de mouture subissent des modifications au cours du temps (KERMICHE Meryem, 2013).

La flore microbienne du blé accompagne normalement les grains sains, Celle qui se développe au cours du stockage se caractérise par la succession de deux types écologiques : de nouvelles espèces dites de stockage, prenant l'avantage sur les espèces champêtres (Feillet Pierre, 2000).

Les moisissures des farines sont caractérisées par leur possibilité d'intense et rapide sporulation, ce qui assure leur dissémination aisée. Il est bien évident que la mycoflore d'une farine est le reflet de la mycoflore des grains dont elle est issue. Pendant l'étape de broyage des grains au moulin, provoquant la fragmentation des éléments mycéliens et assurant une bonne dispersion des spores, il arrive qu'une farine soit plus contaminée que les grains qui ont servi à sa préparation (MOREAU Claude, 1970).

Cependant la flore fongique d'une farine n'est pas identique à celle des grains. Les éléments correspondant à la « flore des champs » ont pratiquement disparu au cours de l'entreposage des grains, par contre les champignons correspondant à la flore dite de « stockage » sont beaucoup plus développés (MOREAU Claude, 1970).

Les différentes flores microbiennes relatives au blé et à ses dérivés sont présentées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Flore microbienne du blé (Sauer et al., 1982) (Zillinsky, 1983) (Pettersson et Schnürer, 1995) (Mathew et al., 2011)

Moisissures	Flore des champs	1) <i>Alternaria</i> 2) <i>Fusarium</i> 3) <i>Cladosporium</i> 4) <i>Epicoccum</i> 5) <i>Helminthosporium</i> 6) <i>Chaetomium</i> 7) <i>Curvularia</i> 8) <i>Rhizopus</i> 9) <i>Stemphylium</i>
	Flore intermédiaire	10) <i>Cladosporium</i> 11) <i>Rhizopus</i> 12) <i>Absidia</i> 13) <i>Mucor</i>
	Flore de stockage	14) <i>Aspergillus</i> 15) <i>Penicillium</i>
Levures	Flore des champs	16) <i>Saccharomyces</i> 17) <i>Candida</i> 18) <i>Hansenula</i> 19) <i>Pichia</i>
	Flore de stockage	20) <i>Pichia anomala</i>
Bactéries	21) <i>Pseudomonadaceae</i> (<i>Pseudomonas</i>) 22) <i>Xanthomonadaceae</i> (<i>Xanthomonas</i>) 23) <i>Enterobacteriaceae</i> 24) <i>Lactobacillaceae</i> 25) <i>Bacillaceae</i>	

4- Les moisissures dans la farine:

Le mot moisissure est un terme générique qui regroupe tous les champignons microscopiques d'aspect lévuriforme ou filamenteux (micromycètes). Ce sont des champignons ubiquistes à croissance filamenteuse. Par ailleurs, ils sont saprophytes (plus rarement parasites), c'est-à-dire qu'ils vivent aux dépens de matières organiques en décomposition en y implantant leur mycélium, qui émet alors des filaments porteurs de spores, les unités de dissémination (Alban Gauthier, 2016).

Dans toutes les farines et dans la plupart des conditions de stockage, ce sont les champignons des genres *Aspergillus* et *Penicillium* qui prédominent tant aux États-Unis, Canada, en Angleterre, aux Indes et au Japon qu'en France. On trouve cependant parfois quelques vestiges de la flore dite « du champ » : *Cladosporium* et *Alternaria* qui colorent la farine, mais la plupart demeurent dans le son. Aux températures assez élevées, les Mucorales prennent souvent une certaine extension (MOREAU Claude, 1970).

Une analyse caractéristique est fournie par Graves et Hesseltine correspondant à une dizaine d'échantillons provenant de moulins variés des États-Unis. Sur 242 thalles recensés au total on constate que les espèces les plus fréquentes sont : *Aspergillus Candidus* (27,7 % des isolements), *Penicillium cyclopium* (16,9 %), puis *P. urticae* (7,9 %) et *P. citrinum* (7,9 %), *A. flavus* (5,8 %), *A. clavatus* (5,0 %), les *Aspergillus* du groupe glaucus venant ensuite (MOREAU Claude, 1970).

5- Principales moisissures toxigènes présentes dans la farine:

Deux groupes de moisissures toxigènes peuvent être distingués, le premier type est constitué de moisissures envahissant leur substrat et produisant la mycotoxine sur des plantes sénescents ou stressés : il sera question de toxine de champs. L'autre groupe rassemble ceux qui produisent les toxines après récolte ; on les qualifiera de toxines de stockage. Ainsi, des champignons du sol ou de débris de plantes peuvent disséminer leurs spores sur la plante ou les grains puis proliférer pendant le stockage si les conditions le permettent (MOREAU Claude, 1970).

Plus de cent mille moisissures différentes sont susceptibles de souiller les produits agricoles et alimentaires. Ce sont des espèces saprophytes tirant leurs apports nutritionnels des matières organiques. Le développement de moisissures se produit dès les champs.

Les conditions de récoltes influencent fortement le niveau de colonisation des végétaux. Une saison humide induira le développement de *Fusarium* sur les céréales (Guy LEYRAL, Elisabeth VIERLING, 2007).

5-1 Genre *Fusarium*:

Le caractère qui définit le genre *Fusarium* est la production de conidies septates, fusiformes à croissants, appelées macroconidies, avec une cellule basale en forme de pied et une cellule apicale plus ou moins à bec. Les macroconidies peuvent être produites dans des pustules discrètes, appelées sporodochies, ou dans des masses visqueuses confluentes, appelées pionnotes. Les montures de ces zones, qui sont habituellement crème, rose saumon ou orange, révéleront des masses de ces spores. Cependant, ils sont rarement largement répartis dans la colonie et sont souvent totalement absents (Pitt et al., 2009).

Les espèces de *Fusarium* sont réputées pour leur rôle de phytopathogènes, causant un large éventail de maladies telles que les flétrissures vasculaires, les pourritures des racines et des tiges, la brûlure pré- et postémergence et bien d'autres. Les espèces de *Fusarium* sont largement répandues dans les sols, en particulier les sols cultivés, et sont actives dans la décomposition des matières végétales cellulosiques. Elles sont une cause majeure de la pourriture des fruits et légumes et sont généralement associées aux céréales et aux légumineuses, qu'elles envahissent habituellement avant la récolte (Pitt et al., 2009).

Le *Fusarium* est l'un des trois principaux genres fongiques produisant des toxines. Les mycotoxines *Fusarium* les plus répandues sont les trichothécènes, une famille de sesquiterpènes. On sait que plus de 50 de ces composés sont produits par des espèces de ce genre. Certains sont très toxiques : aucun ne semble bénin. Les trichothécènes sont souvent produits en mélange même dans des conditions de culture pure et sont très difficiles à séparer, de sorte que la toxicité de nombreux composés demeure incertaine (Pitt et al., 2009).

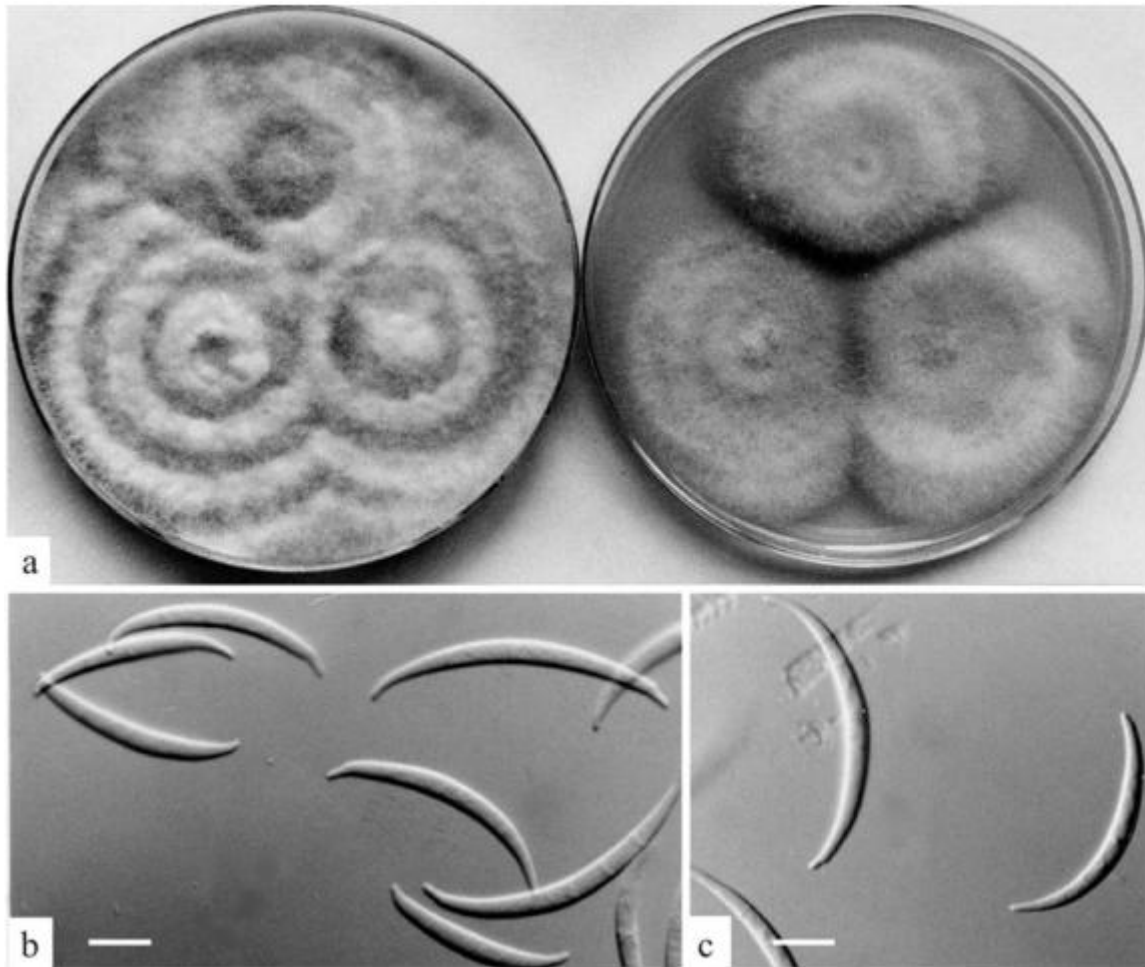


Figure II.3 : (a) Colonies de *Fusarium acuminatum* ; (b, c) macroconidies (Pitt et al., 2009).

5-2 Genre *Penicillium*:

Le genre *Penicillium* comprend entre 150 et 300 espèces, réparties en quatre sous-genres appartenant à la division des Deutéromycètes (Alban Gauthier, 2016).

Les colonies présentent un aspect duveteux voire poudreux, de couleur vert-de-gris et, plus rarement, blanche. Morphologiquement, les individus du genre *Penicillium* se distinguent par leur organisation en pinceau (*Penicillius* en latin) (Alban Gauthier, 2016).

Genre polyphage et saprophyte, *Penicillium* est responsable de nombreuses dégradations. Il est très commun dans l'environnement ; on le retrouve aussi bien dans le sol et les matières organiques en décomposition que dans les denrées alimentaires telles que les céréales, les arachides et les produits laitiers. C'est un contaminant très fréquent des régions tempérées ; sa croissance est optimale pour des températures comprises entre 20 et 27 °C et pour une humidité importante (Alban Gauthier, 2016).

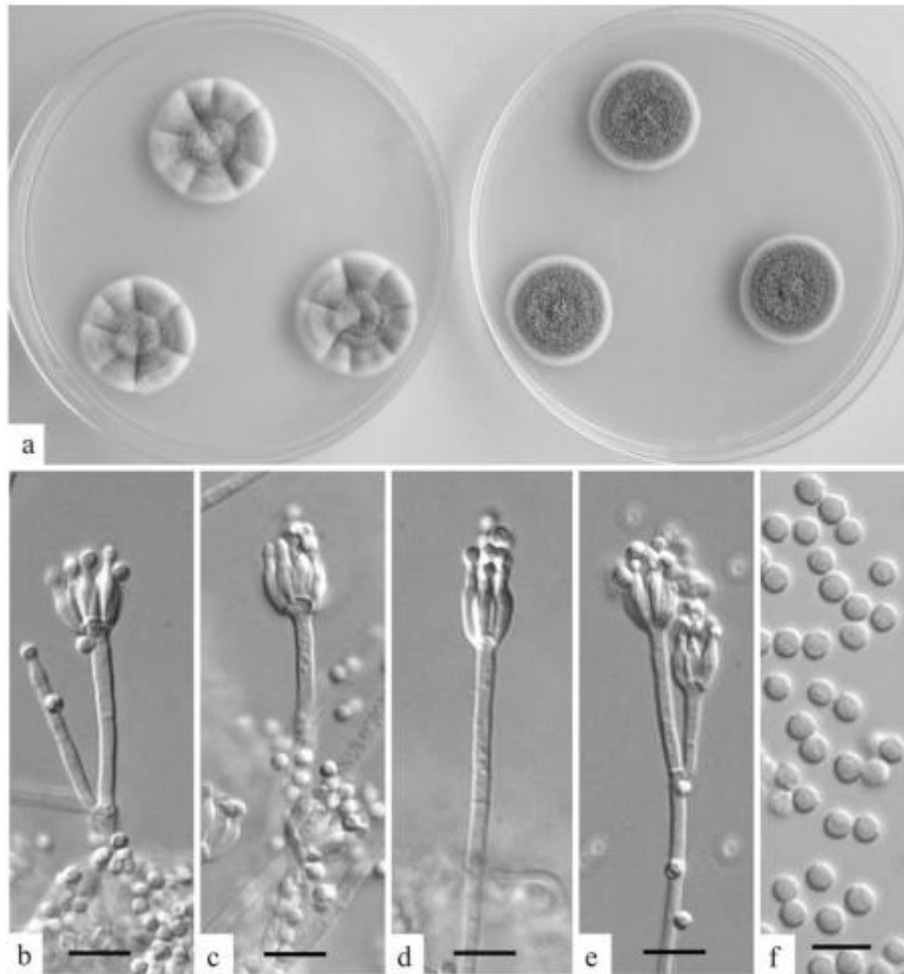


Figure II.4 : (a) Colonies de *penicillium citreonigrum* ; (b, c, d, e) pénicilles ; (f) conidies (Pitt et al., 2009).

5-3 Genre *Aspergillus*:

Le genre *Aspergillus* est classé dans la division des Deutéromycètes. Environ 180 espèces, réparties en 18 groupes, composent ce genre. Sur ces 180 espèces, une vingtaine est pathogène pour l'homme et l'animal (Alban Gauthier, 2016).

Les colonies d'*Aspergillus spp*, duveteuses ou poudreuses, à développement rapide, sont le plus souvent de couleurs vives et variées (Alban Gauthier, 2016).

La répartition géographique des *Aspergilli* est assez vaste. Ils sont le plus souvent présents dans les zones tropicales et subtropicales, donc adaptés à des climats chauds et à des milieux pauvres en eau. C'est pourquoi ils se développent très bien dans les produits alimentaires dits « secs » (salaisons, blé, farines, arachide, etc.) (Alban Gauthier, 2016).

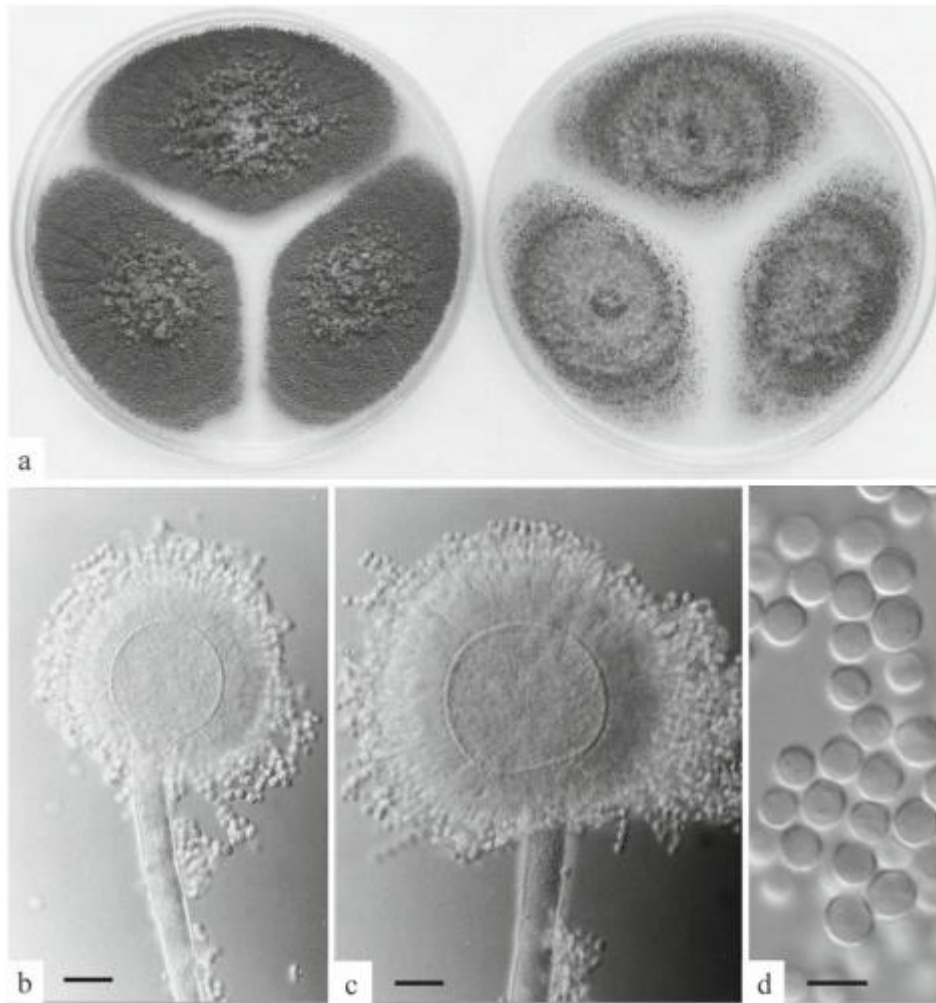


Figure II.5 : (a) Colonies d'*Aspergillus flavus* ; (b, c) têtes ; (d) conidies (Pitt et al., 2009).

5-3 Genre *Claviceps*:

Les espèces du genre *Claviceps* ne sont pas classées dans la division des Deutéromycètes. En effet, le mode de reproduction sexué a été identifié chez tous les individus de ce genre. C'est donc un genre prenant place à part entière dans la famille des Clavicipitacées, division des Ascomycètes. Il regroupe une cinquantaine d'espèces produisant plus de cinquante alcaloïdes différents (Alban Gauthier, 2016).

L'espèce la plus représentative est *Claviceps purpurea*, agent responsable de la maladie de l'ergot du seigle chez les végétaux et de l'ergotisme chez l'homme et l'animal. Il était provoqué par l'ingestion de farines contaminées par les alcaloïdes produits par le sclérote de *Claviceps spp* (Alban Gauthier, 2016).

6- Les mycotoxines dans la farine:

Le terme mycotoxine provient du grec ancien « Mycos », qui signifie champignon, et du latin « Toxicum » signifiant poison. Les mycotoxines sont donc des substances toxiques, sécrétées essentiellement par les micromycètes. Ce sont plus précisément des métabolites de faible poids moléculaire dits secondaires, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas indispensables au fonctionnement des champignons. Ils résultent de la dégradation de métabolites primaires rassemblant les sucres, les lipides, les acides aminés et les acides nucléiques, qui eux participent à la nutrition et à la croissance d'un organisme. Elles sont, chez l'animal et l'humain qui en consomment, à l'origine d'effets biologiques nocifs regroupés sous le terme de mycotoxicoses (Alban Gauthier, 2016) (NGUYEN MINH TRI, 2007).

Les mycotoxines sont produites dans les matières alimentaires, leur décontamination est très difficile. Ces molécules ne sont pas détruites au cours d'un stockage prolongé et sont souvent résistantes aux traitements thermiques ou chimiques (NGUYEN MINH TRI, 2007).

En général, plus d'une mycotoxine vont être trouvées sur un substrat contaminé. Quelques moisissures sont capables de produire plusieurs mycotoxines et quelques mycotoxines sont produites par différentes espèces fongiques (Hussein S., Jeffrey M. 2001). Les facteurs qui affectent la formation de mycotoxines incluent la teneur en eau, la température, le temps de stockage, les dommages aux enveloppes des graines, la présence d'oxygène et de dioxyde de carbone, la composition du substrat, la prédominance d'espèces toxigènes, la dispersion des spores, les interactions microbiennes et la présence d'insectes (NGUYEN MINH TRI, 2007) (Pitt et al., 2009).

6-1 Substrat:

Un champignon n'est pas forcément capable de se développer sur n'importe quel substrat. Cette spécificité de substrat provient de différences physiques (activité de l'eau, conductivité thermique, oxygénation) et chimiques (composition en lipides, protéines, acides aminés, acides gras, minéraux) (NGUYEN MINH TRI, 2007).

6-2 Activité de l'eau et son action sur la croissance microbienne:

L'activité de l'eau est un concept physico-chimique, introduit par Scott (1957). Elle permet de rendre compte de la quantité d'eau « libre » indispensable aux réactions biochimiques d'un micro-organisme. Il a été montré qu'il y a une relation entre l'humidité dans l'aliment et la capacité de croissance microbienne. La plupart des moisissures préfèrent une activité de l'eau entre 0,85 et 0,99 pour leur développement.

L'activité de l'eau minimale permettant le développement de la plupart des champignons contaminant les céréales est de 0,7 (Alban Gauthier, 2016) (NGUYEN MINH TRI, 2007).

L'activité de l'eau requise pour la croissance d'une moisissure est inférieure à celle requise pour la mycotoxinogénèse. La présence d'une moisissure dans un aliment ne signifie donc pas obligatoirement qu'on y retrouvera des toxines fongiques (Alban Gauthier, 2016).

6-3 Température:

Les moisissures peuvent se développer entre 0 °C et 35 °C. Certaines espèces sont capables de se développer à des températures extrêmes. En général, la température optimale de toxinogénèse est voisine de la température optimale de croissance (NGUYEN MINH TRI, 2007).

6-4 Composition gazeuse:

La plupart des moisissures sont aérobies. La réduction de la pression partielle en oxygène et surtout l'accroissement de la teneur en CO₂ ont un effet inhibiteur important sur la toxinogénèse. Après conservation dans une atmosphère confinée, dans laquelle les moisissures peuvent plus ou moins se développer, la remise à l'air libre ou la ventilation provoque rapidement une intense toxinogénèse (NGUYEN MINH TRI, 2007).

6-5 Interactions entre organismes:

La présence simultanée de micro-organismes (bactéries ou moisissures) influe la production de mycotoxines. Il y a compétition entre différents champignons. Le taux d'aflatoxine est souvent moins important lorsqu'*A. parasiticus* est introduit dans le milieu de culture en même temps qu'*A. flavus*. Le même phénomène est observé lorsque la souche introduite simultanément est une souche non-toxinogène. Le rapport Aflatoxine B1 / Aflatoxine G1 est modifié, même si globalement la quantité totale est identique. Il a été montré que lorsqu'*A. parasiticus* ou *A. ochraceus* poussent en même temps que *A. flavus*, il n'y a pas diminution de la production d'AF. En revanche, la présence de *Penicillia* diminue significativement le taux d'Aflatoxine. L'inhibition de la production d'Aflatoxine par *A. flavus* lorsqu'*A. niger* est présent, est due à la synthèse par ce dernier d'un produit inhibant la biosynthèse d'Aflatoxine. L'Ochratoxine A à faible concentration (< 0,5 mg/l) n'a d'effet ni sur la croissance d'*A. parasiticus*, ni sur la production d'AF, par contre à forte concentration (> 2,5 mg/l), la synthèse d'Aflatoxine est stimulée. On avance l'hypothèse que l'OTA augmente la production d'Aflatoxine, parce que, comme l'Ochratoxine A découple la phosphorylation oxydative, il y a accumulation d'entité acétate, nécessaire à la biosynthèse d'AF (NGUYEN MINH TRI, 2007).

Quand *A. parasiticus* croit en présence de *Streptococcus lactis* ou *Lactobacillus casei*, la quantité d'AF diminue. Ceci se produit quand la contamination par les deux agents est séquentielle, en revanche si la contamination débute au même instant, on note une amplification de la production d'Aflatoxine (NGUYEN MINH TRI, 2007).

La présence de plusieurs espèces fongiques sur la même denrée a généralement un effet inhibiteur sur la production d'une 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 (NGUYEN MINH TRI, 2007).

7- Origines endogènes et exogènes des spores:

Il y a deux modes de formation de spores asexuées :

7-1 Spores endogènes:

Chez les Mucorales, les endospores sont produites à l'intérieur d'un sac appelé sporocyste (ou sporange) porté par un filament spécialisé. Ainsi les spores asexuées sont libérées par déchirement de la paroi du sporocyste à maturité (Chabasse et al., 2002).

7-2 Spores exogènes:

Chez les Basidiomycètes, les Ascomycètes et les Deutéromycètes, les spores asexuées sont formées par bourgeonnement à partir d'une cellule spécialisée appelée cellule conidiogène. Les spores ainsi produites sont appelées conidies (Chabasse et al., 2002).

7-3 La flore microbienne des aliments:

Parce qu'ils nous fournissent les éléments nutritifs, les aliments sont aussi d'excellents milieux pour la croissance des microorganismes. Cette croissance est contrôlée par des facteurs liés à l'aliment lui-même, ou facteurs intrinsèques, et aussi par d'autres, liés à l'environnement où l'aliment est conservé, ce sont les facteurs extrinsèques (Nancib Aicha, 2019).

7-3-1 Les facteurs intrinsèques:

Les facteurs intrinsèques ou associés aux aliments, comprennent le pH, l'activité ou la disponibilité de l'eau, le potentiel d'oxydo-réduction, la structure physique de l'aliment, les éléments nutritifs disponibles et la présence possible d'agents antimicrobiens naturels (Nancib Aicha, 2019).

7-3-1-a La composition de l'aliment:

La composition d'un aliment est un facteur intrinsèque crucial qui influence la croissance microbienne.

- 8 Si un aliment consiste surtout en hydrates de carbone, c'est la croissance de champignons, plutôt que de bactéries, qui prédominera et la détérioration ne produira pas beaucoup d'odeurs. Des aliments comme les pains, les confitures et certains fruits, gâtent d'abord sous l'action des champignons.
- 9 Par contre, lorsque l'aliment contient de grandes quantités de protéines et/ou de graisses (viande et le beurre), la croissance bactérienne peut produire toute une variété d'odeurs infectes. (Œufs pourris). Cette dégradation anaérobie de protéine donne des composés aminés nauséabonds c'est la putréfaction. Une source importante d'odeur est l'amine organique, la cadavérine (NOUREDDINE AZZI, 2019).

7-3-1-b Le Ph:

Tous les micro-organismes ne réagissent pas de la même manière vis à vis du pH. Le pH influe notamment sur la perméabilité cellulaire et la disponibilité des substrats (Nancib Aicha, 2019).

Les levures et moisissures tolèrent une gamme de pH très large pour la croissance (de 2 à 8,5) avec un pH optimal entre 4 et 6. La plupart des bactéries se multiplient quant à elles en milieu neutre mais la gamme de tolérance pour le pH peut être assez large. Lorsque le pH est inférieur à 4,5, la croissance des bactéries est inhibée. C'est la raison pour laquelle, les aliments acides se conservent mieux (comme par exemple le citron, le vinaigre, la tomate, l'orange, etc.) et que l'on utilise du vinaigre pour la conservation de certains aliments. Les moisissures et les levures se développent ainsi à la surface des fruits acides alors que les bactéries colonisent les viandes et poissons dont le pH est neutre (Nancib Aicha, 2019).

7-3-1-c L'activité de l'eau (A_w):

La plupart des aliments que nous consommons contiennent 20 à 90% d'eau et ne sont à l'abri des détériorations biochimiques enzymatiques et microbiennes. La présence et la disponibilité de l'eau affectent aussi la capacité de microorganismes de coloniser les aliments. On peut contrôler ou éviter sa détérioration par le séchage de l'aliment, en rendant l'eau moins disponible, même si elle est présente, par l'ajout des solutés comme le sucre et le sel.

Les conditions hypertoniques rendent la multiplication des microorganismes difficile en leur provoquant une déshydratation (NOUREDDINE AZZI, 2019). Les Pseudomonas sont très exigeantes en eau libre et ne se développent bien que si l'activité de l'eau est supérieure à 0,98. Cependant, *Listeria monocytogenes* résiste à des conditions hostiles. Elle tolère jusqu'à 10 % de chlorure de sodium et son A_w limite de croissance est de 0,86. Selon la teneur en A_w , on cite les micro-organismes osmophiles : (du grec osmos, poussée et philien, aimer), se développent mieux dans des milieux dont la pression osmotique est élevée (Nancib Aicha, 2019).

7-3-1-d Le potentiel d'oxydo-réduction:

Le potentiel d'oxydo-réduction d'un aliment influence aussi la détérioration. Certaines bactéries se développent uniquement en présence d'oxygène, on les appelle aérobies stricts, d'autres se développent uniquement en absence d'oxygène (anaérobies strictes). Les autres, qui se multiplient en absence ou en présence d'oxygène sont qualifiées d'aéroanaérobies (Nancib Aicha, 2019) (NOUREDDINE AZZI, 2019).

Les champignons sont des organismes aérobies mais certains peuvent se développer en anaérobie et donc plus en profondeur des aliments (Nancib Aicha, 2019).

7-3-1-e La structure physique:

La structure physique d'un aliment affecte également le déroulement et l'étendue de la décomposition. Broyer et mélanger des aliments, tels que les saucisses et les hamburgers, non seulement, augmentent la surface de la nourriture et altèrent la structure cellulaire, mais dispersent aussi les germes contaminants partout dans la nourriture. Ceci provoque une détérioration rapide si ces aliments sont mal conservés (Nancib Aicha, 2019).

7-3-1-f Les inhibiteurs:

De nombreux aliments contiennent des substances antimicrobiennes naturelles, parmi lesquelles des inhibiteurs chimiques complexes et des enzymes. Les herbes et les épices contiennent souvent des substances antimicrobiennes importantes ; les mycètes y sont généralement plus sensibles que la plupart des bactéries (Nancib Aicha, 2019).

L'un des modes d'inhibition important dans la nature et également dans les aliments, est représenté par l'antagonisme bactérien. Il est direct ou indirect. Dans l'antagonisme direct, le développement d'une espèce ou d'un genre s'oppose à celui des autres. Tout se passe, parfois, comme si le contaminant dont la multiplication est la plus rapide, occupait le terrain.

Dans l'antagonisme indirect, l'espèce qui bloque les autres agit en synthétisant un antibiotique ou des substances dont le rôle est voisin, comme les bactériocines (Nancib Aicha, 2019).

7-3-2 Les facteurs extrinsèques:

Les facteurs extrinsèques ou environnementaux concernent la température, l'humidité relative, les gaz (CO₂, O₂), les types et les quantités de microorganismes présents dans l'aliment.

7-3-2-a L'humidité relative:

L'humidité relative est un des facteurs extrinsèques importants dans l'avarie d'un aliment. Les microbes se développent plus rapidement dans une humidité relative élevée, même à basse température. Quand des aliments secs sont mis à l'humidité, ils absorbent l'eau en surface, ce qui permet finalement une croissance microbienne (Nancib Aicha, 2019).

7-3-2-b La température:

Chaque micro-organisme a un domaine de température optimale favorisant son développement. En fonction de leur température optimale de croissance, on classe les microorganismes en plusieurs groupes dont les noms reflètent les divers domaines de tolérance thermique. On distingue trois types de bactéries selon leur optimum de température :

7-3-2-c Les psychrophiles et les psychrotrophes :

les psychrophiles (ex : *Listeria monocytogenes*) sont des micro-organismes qui se développent à des températures allant de 0 à 20 °C avec un optimum à 15 °C. Ce sont des micro-organismes adaptés au froid. Les micro-organismes appartenant au groupe des psychrotrophes sont capables de se développer de 0 à 35 °C avec un optimum de croissance de 20 à 35 °C. C'est un groupe intermédiaire entre les psychrophiles et les mésophiles, et il est responsable des altérations microbiennes des aliments réfrigérés (Nancib Aicha, 2019).

Le groupe des psychrotrophes est représenté par de nombreuses bactéries dont les principaux genres sont *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Erwinia*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus* et *Streptomyces*. Notons aussi que les levures et moisissures sont pour la plupart psychrotrophes (Nancib Aicha, 2019).

7-3-2-d Les mésophiles :

se multiplient à des températures allant de 20 à 40 °C avec un optimum à 37 °C (NOUREDDINE AZZI, 2019). On les retrouve sur les aliments conservés à température ambiante ou dans les aliments réfrigérés lorsque la chaîne du froid a été rompue. Ce sont des espèces communes et des espèces pathogènes pour l'homme et l'animal ; ils sont pour la plupart des saprophytes naturels. (Ex : *Escherichia coli*, *Salmonelles*, *Staphylocoques*, *Campylobacter*, etc.) (Nancib Aicha, 2019).

7-3-2-e Les thermophiles :

les thermophiles sont les micro-organismes qui se développent dans des températures allant de 40 à 65 °C avec un optimum à 55 °C. On les retrouve dans le sol, l'eau et même dans les sources thermales. En milieux alimentaires, ils sont représentés surtout dans les genres bactéries *Bacillus* et *Clostridium* et certaines moisissures *Aspergillus*, *Cladosporium* (Samson RA et al, 1995) (Nancib Aicha, 2019).

7-3-2-f Atmosphère (présence de gaz):

L'atmosphère, dans laquelle la nourriture est conservée, est également importante. C'est particulièrement vrai pour des aliments emballés sous plastique, car beaucoup de films plastiques permettent une diffusion de l'oxygène qui favorise la croissance de microorganismes. Un excès de CO₂ peut réduire le pH de la solution, inhibant ainsi le développement microbien notamment les moisissures. La conservation de la viande dans une atmosphère riche en CO₂ inhibe les bactéries Gram-négatives, en produisant une population dominée par les lactobacilles (Nancib Aicha, 2019).

8- Les principales mycotoxines contaminant la farine:

8-1 Les trichothécènes:

Les trichothécènes sont une famille de mycotoxines sesquiterpéniques dont la structure chimique centrale est commune, comme le montre la figure I.2. La structure du cycle époxy 12 et 13 est importante pour l'activité biologique et la toxicité. La présence de groupes hydroxyles et la structure et la position des chaînes latérales influencent l'activité biologique. Les trichothécènes peuvent être classés chimiquement en quatre types en fonction des substitutions à cinq positions du squelette de trichothécène, y compris le type A, qui comprend la toxine T-2 et la toxine HT-2 ; le type B, y compris le nivalénol et le DON ; le type C, y compris la crotocine ; et le type D ou les macrocycliques. Les trichothécènes de type

A comprennent certaines des trichothécènes les plus toxiques : la toxine T-2, son métabolite déacétylé, la toxine HT-2 et le DAS (ou anguidine) (Rhian B.Cope, 2018).

Les trichothécènes sont produits par plusieurs genres de champignons, notamment *Fusarium*, *Stachybotrys*, *Myrothecium*, *Trichothecium*, *Trichoderma*, *Cephalosporium*, *Cylindrocarpon*, *Verticimonosporium* et *Phomopsis*. La plus importante source de mycotoxines trichothécènes en Amérique du Nord provient des champignons *Fusarium spp.* Ce sont des agents phytopathogènes importants et des contaminants des grains dans les régions tempérées (fusariose de l'épi dans le blé, l'orge, le triticale et d'autres grains) (Rhian B.Cope, 2018).

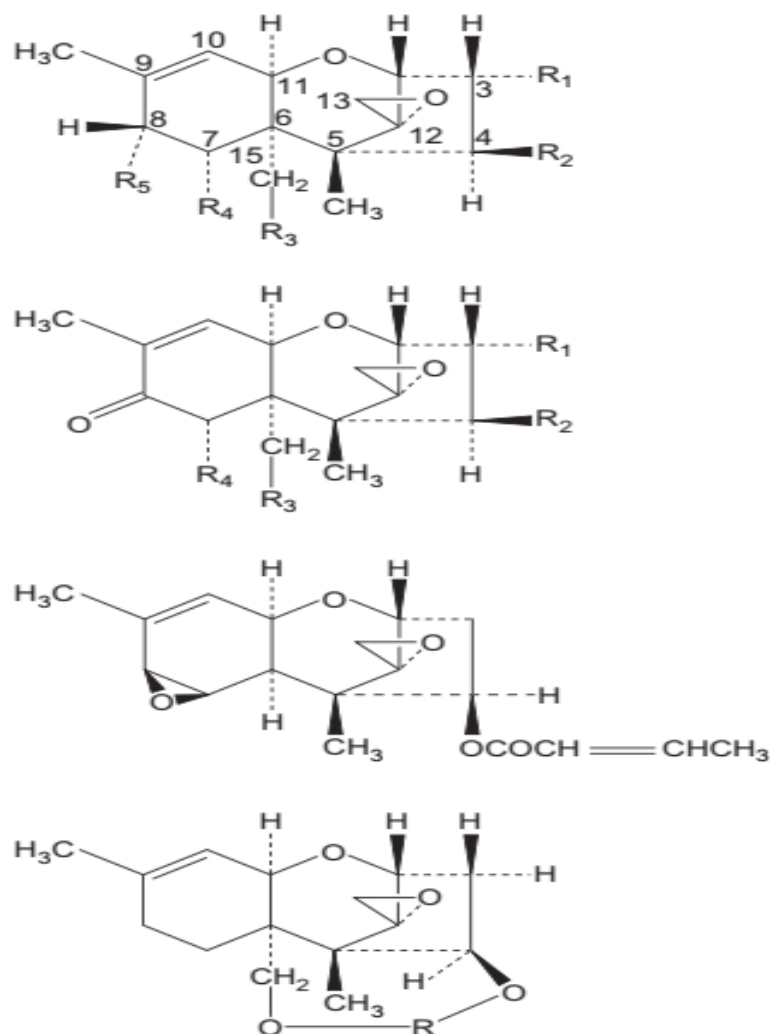


Figure II.6 : Structure chimique de base des trichothécènes (Rhian B.Cope, 2018).

8-2 Aflatoxines:

À la suite d'une maladie « Turkey X disease » qui a affecté la volaille en Angleterre, et plus particulièrement les dindons, Sargeant et al., (1996) ont isolé de la nourriture de ces volailles à base d'arachide, une substance capable d'induire expérimentalement la même maladie. Ce fut le début d'une série de recherches qui aboutit en 1965 à l'isolement et à la caractérisation de la structure des aflatoxines (André EL KHOURY, 2007).

Les aflatoxines sont les cancérogènes naturels les plus puissants connus, affectant les espèces animales, y compris les humains. Quatre aflatoxines sont couramment produites dans les aliments, les aflatoxines B1, B2, G1 et G2. Ces mycotoxines sont produites par *Aspergillus flavus*, *Aspergillus parasiticus*, *Aspergillus nomius*, *Aspergillus pseudotamarii*, *Aspergillus bombycis*, *Aspergillus toxicarius*, *Aspergillus minisclerotigenes*, *Aspergillus*

parvisclerotigenus et *Aspergillus arachidicola*. Du point de vue de la santé publique, les principaux producteurs d'aflatoxines sont *A. flavus* et *A. parasiticus*. L'aflatoxine B1 (AFB1) se trouve souvent aux concentrations les plus élevées dans les aliments contaminés. La contamination la plus prononcée a été observée dans le maïs, les arachides, les graines de coton et les autres cultures céréalières (JECFA, 1997) (Samson et al., 2006) (Pildain et al., 2008) (Gourama and Bullerman, 1995). Les structures chimiques des différents Aflatoxines sont présentées dans la figure II.8.

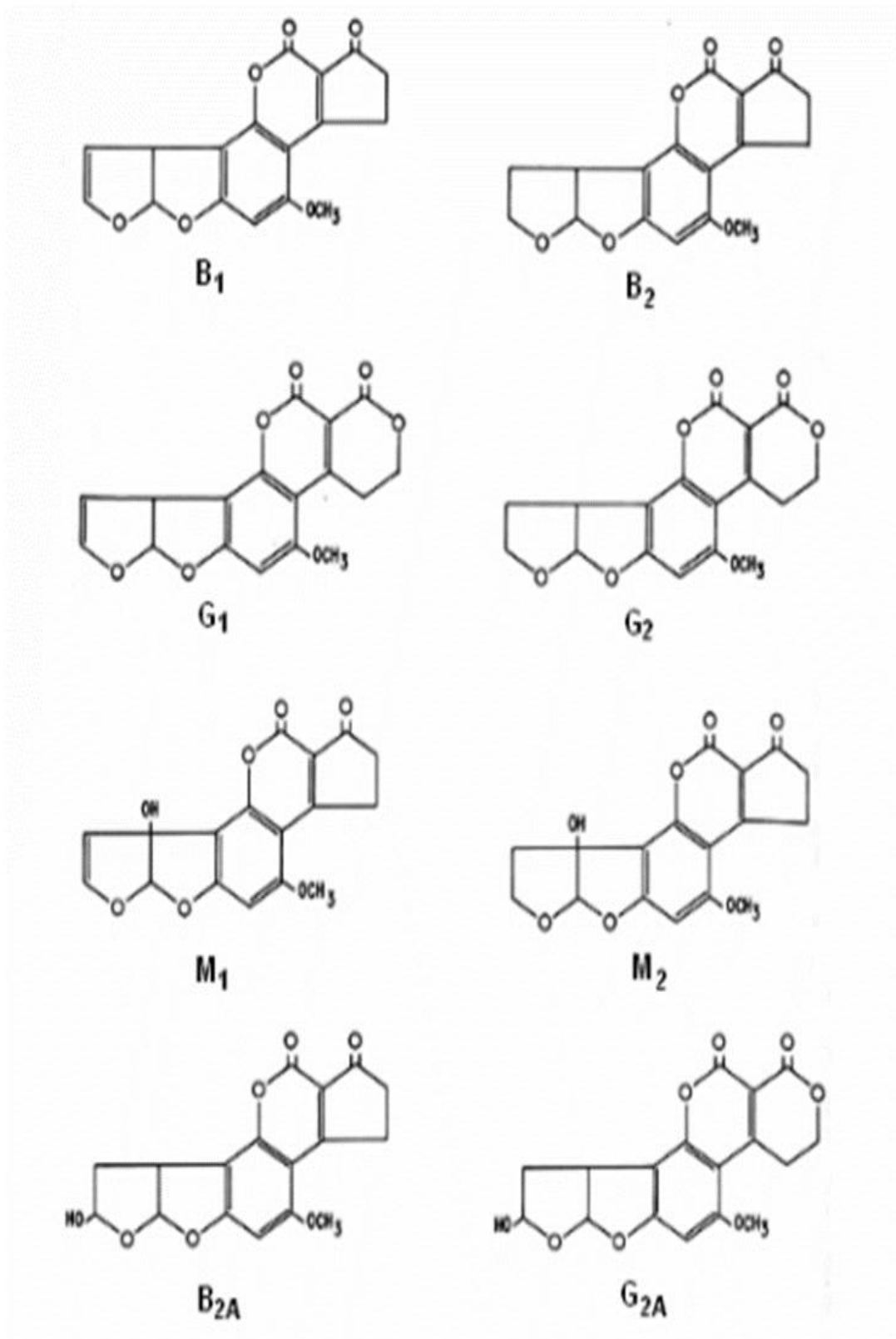


Figure II.7 : Structures chimiques des aflatoxines (NGUYEN MINH TRI, 2007)

Tableau II.2 : Teneurs maximales en aflatoxines exprimés en µg/kg (afssa ;2006)

Alimentation	Toxine	Matrice	Teneur maximale en µg/kg
Humaine	Aflatoxine B ₁	Arachides (cacahuètes)+ autre graines + fruits secs	De 2.5 ou 8 selon le produit et son stade de transformation
		Céréales	2 ou 5 selon le produit et son stade de transformation
		Certaines épices	5
		Preparations à base de céréales et aliments pour nourrissons et enfants en bas âge	0.1
	Aflatoxine B ₁ +B ₂ +G ₁ +G ₂	Arachides (cacahuètes)+ autres Graines + fruits secs	De 4, 10 ou 15 selon le produit et son stade de transformation
		Céréales	4 ou 10 seon le produit et son stade de transformation
		Certaines épices	10
	Aflatoxine M ₁	Lait	0.05
		Préparation pour nourrissons et enfants en bas âge	0.025
	Animale	Aflatoxine B ₁	Matières premières des aliments pour animaux
Aliments Complets/ complémentaires			De 5 à 20 selon les espèces animales

8-3 Fumonisines:

Le groupe des Fumonisines est constitué d'une quinzaine de molécules différentes, réparties en 4 groupes : les Fumonisines A, B, C et P. Elles ont été identifiées assez tardivement en 1988. Les Fumonisines les plus fréquemment rencontrées sont les Fumonisines du groupe B (Bezuidenhout, S. C. et al., 1988).

La structure chimique générale des Fumonisines est présentée dans la figure II.10. Ainsi, les structures chimiques des principales Fumonisines sont élucidées dans le tableau II.2 et ce par rapport aux différentes ramifications possibles (R1, R2 et R3).

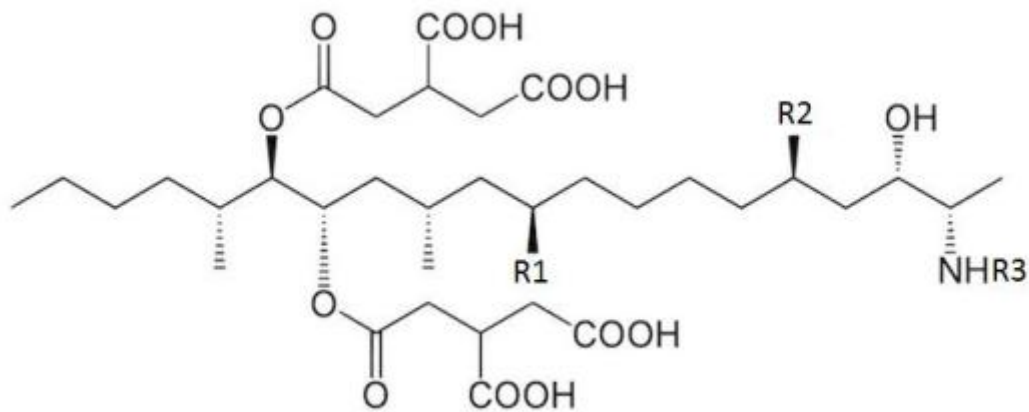


Figure II.8: Structure chimique générale des Fumonisines (Alban Gauthier, 2016).

Tableau II.3 : Structures chimiques des principales Fumonisine (Alban Gauthier, 2016).

Dénomination	R1	R2	R3
Fumonisine A1	OH	OH	NHCOCH ₃
Fumonisine A2	H	OH	NHCOCH ₃
Fumonisine B1	OH	OH	NH ₂
Fumonisine B2	H	OH	NH ₂
Fumonisine B3	OH	H	NH ₂
Fumonisine B4	H	H	NH ₂
Fumonisine C1	OH	OH	NH ₂
Fumonisine C2	H	OH	NH ₂
Fumonisine C3	OH	H	NH ₂
Fumonisine C4	H	H	NH ₂
Fumonisine P1	OH	OH	OH-Pyr
Fumonisine P2	H	OH	OH-Pyr
Fumonisine P3	OH	H	OH-Pyr

9- Evolution de la mycoflore:

Comme celle des grains en cours de stockage, la mycoflore des farines ne demeure pas stable mais évolue surtout en fonction des conditions d'entreposage (MOREAU Claude, 1970).

En conditions humides, la pollution fongique de la farine s'accroît très vite : de la farine à 18,5 % HR, stockée à 20 °C, a vu son taux de pollution passer de 1 000 à 6 700 000 en 8 semaines, tandis que la même farine, humidifiée à 23,5 %, présentait plus de 4 900 000 germes fongiques par gramme en 4 semaines (MOREAU Claude, 1970).

Un stockage prolongé, dans de bonnes conditions, paraît être favorable à une diminution de la pollution, peut-être à la faveur d'une dessiccation de la farine, car la plupart des espèces recensées sont réputées longévives (MOREAU Claude, 1970).

10- Conséquences de la présence de moisissures dans les farines:

La présence de moisissures dans une farine a pour première conséquence de contribuer à en modifier les qualités ; elle entraîne notamment un accroissement de l'acidité organique liée à une libération d'acides gras au détriment de la teneur en lipides ; on constate aussi, souvent, une diminution de la teneur en acide nicotinique et en thiamine et une augmentation de celle en riboflavine. Ces modifications des farines les rendent souvent impropres à la fabrication du pain, certaines farines rancissent, d'autres ont une forte odeur de moisi, d'autres sont colorées par l'abondance des spores (MOREAU Claude, 1970).

Mais la conséquence la plus grave de la présence de moisissures dans les farines concerne la santé publique. Parmi les champignons recensés, il en est plusieurs qui sont réputés comme ayant des dérivés de métabolisme toxiques. Parmi les espèces les plus fréquentes, indiquons que :

- L'*Aspergillus flavus* élabore des aflatoxines, hautement cancérigènes ;
- L'*Aspergillus clavatus* et le *Penicillium urticae* élaborent de la clavacine qui induit de graves troubles nerveux ;
- Le *Penicillium citrinum* élabore de la citrinine, responsable de lésions rénales ;
- Des *Aspergillus* du groupe glaucus et des Mucorales sont liés à des troubles de la croissance et des hémorragies internes (MOREAU Claude, 1970).

Chapitre III : Traitement et analyse du blé tendre et de la farine

Chapitre III : Traitement et analyse du blé tendre et de la farine

1- Introduction:

La qualité technologique du blé tendre (*Triticum aestivum L.*) et son amélioration sont parmi les principales préoccupations des céréaliers nationaux. La satisfaction des besoins de l'industrie agroalimentaire et des consommateurs est la condition de la qualité requise dans la transformation du blé. Ainsi, les variations des qualités technologiques des récoltes, liées particulièrement aux taux de protéines, peuvent pénaliser leur valorisation à l'exploitation. La qualité technologique du blé tendre dépend essentiellement de ses protéines de réserve, dont principalement le groupe des prolamines qui englobent les gliadines et les gluténines. En effet, ces protéines sont déterminantes à la capacité du gluten à former son réseau viscoélastique essentiel aux processus technologiques. Dans le gluten, les gliadines sont responsables de la viscosité du réseau alors que les gluténines agissent davantage sur son élasticité (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016).

Bien que les produits céréaliers ne soient pas considérés comme denrées périssables, tel est le cas de la viande et du lait, mais leur spécification microbiologique est nécessaire et obligatoire, en raison de la possibilité de survie et de multiplication de plusieurs types de microorganismes dans les farines. Ceci résulte généralement des mauvaises conditions de stockage et se répercute négativement sur la santé du consommateur par les maladies infectieuses et des intoxications alimentaires qu'il peut lui engendrer (Ennadir J. et al., 2012).

En meunerie, les problèmes de microbiologie sont liés d'un côté aux matières premières (les grains), car ils conditionnent en grande partie la contamination des produits. Quant aux produits, l'hétérogénéité de la répartition de la microflore dans le grain conduit à des niveaux de contamination différents entre farines, remoulages et sons. De plus, le stockage, le nettoyage, la préparation et la mouture du blé ainsi que la conservation et un éventuel traitement des produits ne sont pas sans conséquence sur l'évolution de la microflore (POTUS J. et SUCHE P., 1989).

Issues d'une contamination généralement d'origine végétale, les mycotoxines constituent un grave problème de la qualité et de la sécurité sanitaire des aliments. Des règlements ou des recommandations ont été édictés au niveau national puis européen et des valeurs guides existent au niveau mondial pour fiabiliser les échanges commerciaux des denrées alimentaires quant à la sécurité sanitaire (MEHREZ A., 2008).

2- Stratégies de contrôle après la récolte du blé tendre:

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 (MEHREZ A., 2008).

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 propres 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).

Le séchage des grains doit être réalisé aussi vite que possible, de préférence immédiatement après la récolte et par un système d'air chaud, afin d'empêcher la contamination par les champignons et leurs toxines. Il faut s'assurer aussi d'un taux d'humidité inférieur à 14-16 %, d'une durée du stockage intermédiaire de moins de 10 jours et une température inférieure à 20 °C (Codex Alimentarius Commission, 2004).

De plus, la présence d'oxygène présente un facteur déterminant pour le développement de la plupart des moisissures ; les champignons toxigènes sont des aérobies obligatoires. L'application d'une atmosphère pauvre en oxygène ou bien la fumigation au dioxyde de carbone à un taux supérieur à 35 %, ou par d'autres gaz, semblent réduire la production de l'ochratoxine par *Aspergillus ochraceus* (Pitt et Hocking, 2009) (MEHREZ A., 2008).

Par ailleurs, la présence d'insectes et la formation de moisissures dans les entrepôts pourraient être réduites par l'utilisation des insecticides et des fongicides agréés et appropriés. Le choix de ces produits chimiques dépend de leur taux d'application, de la nature de la récolte, des espèces fongiques présentes dans les denrées et des conditions de stockage (European Commission report, 1999).

L'utilisation de certains insecticides comme le dichlorvos, permet de réduire la production d'OTA. Également, l'utilisation d'acides organiques en tant qu'agents de conservation, tel que l'acide propionique, peut s'avérer utile dans la mesure où ces acides suppriment efficacement les moisissures et préviennent l'apparition de mycotoxines dans le blé tendre destiné uniquement à l'alimentation animale. Néanmoins, ces composés peuvent agir négativement sur le goût et l'odeur du blé (Wu et Ayres, 1979).

Un traitement combiné d'acide propionique (0,05- 0,15 %) et de nisine (500 - 1000 ppm) semble exercer des propriétés fongistatiques traduites par une inhibition significative d'*Aspergillus ochraceus* et *Fusarium moniliforme* et assurer aussi le contrôle de la production de certaines aflatoxines (AFB1 et AFG1) par *Aspergillus parasiticus* (MEHREZ A., 2008).

En ce qui concerne la lutte biologique, l'utilisation de bactéries, champignons et levures antagonistes constitue une approche plus prometteuse et une alternative possible des traitements par les fongicides dans la prévention de la formation de mycotoxines particulièrement après la récolte (Kabak et al., 2006).

Certaines levures antagonistes telles que *Pichia anomala* et *Saccharomyces cerevisiae* se sont montrées capables de réduire la biosynthèse et l'accumulation d'OTA à des niveaux non détectables in vitro chez deux isolats de *Penicillium verrucosum* (MEHREZ A., 2008).

Certaines huiles essentielles extraites de la menthe et d'origan sont efficaces contre le développement de champignons ochratoxinogènes en inhibant complètement le développement d'*Aspergillus ochraceus* NRRL 3174 et la production d'OTA après 21 jours (Basílico & Basílico, 1999).

Toutefois, l'élimination totale des moisissures et de leurs toxines est pratiquement impossible, c'est pourquoi il semble important de compléter le panel des pratiques préventives par des traitements industriels appropriés des denrées alimentaires contaminées (MEHREZ A., 2008).

3- Caractéristiques de la farine:

Pour l'échantillonnage, 300 g de farine sont nécessaires pour une analyse courante (Hydro-bromatologie, 2020).

3-1 Caractéristiques organoleptiques:

Le but de la détermination des propriétés organoleptiques est de définir l'état de conservation et la détermination de la pureté de la farine (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016) (Hydro-bromatologie, 2020).

3-1-1 Essai au toucher:

L'essai au toucher consiste à serrer dans la main une poignée de farine puis ouvrir et observer : la farine de blé tendre forme une espèce de pelote (boule). Les farines premières de blé tendre ont un toucher doux, liant (souple), soyeux et fleurant (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016) (Hydro-bromatologie, 2020).



Figure III.1 : Essai au toucher de la farine de blé tendre

3-1-2 Odeur:

Il s'agit de préparer un pàton avec de l'eau tiède et sentir. L'odeur de la farine est franche, agréable, analogue à celle de la noisette. Les farines bises (grises) ont une odeur qui rappelle celle du son. Une odeur acide, rance, acre indique que la farine est ancienne, et une odeur de moisi indique que la farine est en voie d'altération. La farine peut absorber et retenir les odeurs étrangères lors de sa conservation et de son transport. Une farine contaminée par les produits odorants est inutilisable (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016) (Hydro-bromatologie, 2020) (Boulkour A., Lamri N. et Tazir N., 2009).

3-1-3 Saveur:

La saveur normale de la farine est agréable et caractéristique douçâtre avec arrière-goût amer pour les queues de la mouture (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016). La farine normale obtenue des grains sains a une saveur normale légèrement douce tandis que la farine des grains germés a une saveur douce sucrée (Boulkour A., Lamri N. et Tazir N., 2009).

L'addition de farine étrangère peut être aussi décelée ainsi que celle de graines parasites (mélilot, etc.). La saveur acre indique que la farine est ancienne, par contre la saveur aigre indique que la farine est altérée. Ainsi, la farine ne doit pas crisser sous la dent sinon on suspecte la présence de sable et d'impuretés minérales (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016) (Boulkour A., Lamri N. et Tazir N., 2009).

3-1-4 Couleur:

Les composés responsables de la couleur de la farine sont principalement les caroténoïdes (carotène) et les xanthophylles (lutéine). Leur concentration varie de 1.45 à 4.3 ppm (Boulkour A., Lamri N. et Tazir N., 2009).

La couleur varie avec le taux d'extraction et avec la nature de blé. La farine dont le taux d'extraction moyen (70 %) est blanche plus ou moins crème pour celle obtenue à partir de blé

tendre. Si le taux d'extraction est élevé (80 % et plus), la couleur varie du crème au marron clair. Cette couleur indique la présence de piqûres (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016) (Hydro-bromatologie, 2020).

3-2 Caractéristiques physico-chimiques:

3-2-1 Le taux d'extraction:

Le taux d'extraction est le pourcentage du grain qui a donné de la farine. Pour effectuer l'extraction, on enlève les enveloppes qui donnent le son (on y trouve beaucoup de fibres) et le germe (qui contient beaucoup de lipides susceptibles d'oxyder). Plus l'extraction est poussée, plus la proportion de protéines, lipides, fibres, vitamines et minéraux est élevée (Tableau III.1). La farine aura alors de très bonne qualité nutritionnelle mais de mauvaises qualités organoleptiques (goût) (Boulkour A., Lamri N. et Tazir N., 2009).

Tableau III.1 : Composition chimique des farines en fonction des taux d'extraction
(Boulkour A., Lamri N. et Tazir N., 2009)

Constituants	42-46 %	75 %	80 %	85 %	100 %
Cendres	0.34	0.44	0.60	0.76	1.55
Fibres	Trace	0.10	0.13	0.33	2.17
Protéines	11.9	13.2	13.4	13.7	13.8
Matière grasse (%)	0.87	1.34	1.45	1.72	2.0
Hydrate de carbone (amidon)	72.1	70.3	69.6	68.0	63.7
Thiamine (mg/kg)	0.28	0.92	2.05	2.91	3.73
Riboflavine (mg/kg)	0.5	0.7	0.8	1.0	1.7
Niacine (mg/kg)	7.1	9.7	11.1	13.5	55.6
Fer (mg/kg)	9.6	13.7	16.7	22	30.8
Sodium (mg/100g)	1.8	2.9	2.9	4.1	3.2
Potassium (mg/100g)	72	88	113	148	316
Calcium (mg/100g)	11.2	13.2	15.6	18.7	27.9
Magnésium (mg/100g)	21.7	30.7	45.1	62.5	143.0
Cuivre (mg/100g)	0.15	0.22	0.27	-	0.61
Zinc (mg/100g)	1.00	1.23	1.65	2.18	3.77
Phosphore (mg/100g)	83	110	114	190	350

3-2-2 Examen granulométrique:

La granulation des farines est la taille des divers groupes de particules qui les constituent. La détermination du taux d'affleurement permet l'appréciation de la valeur boulangère. L'examen granulométrique consiste à faire passer une quantité de farine à travers les mailles de tamis de soie : 90, 120, 150 et 200. Ces numéros indiquent le nombre de mailles contenues dans la longueur d'un pouce (soit 27 mm). On obtient ainsi des indications sur la finesse de la mouture (Calvel, 1984) (Hydro-bromatologie, 2020).

La granulation de la farine dépend de la nature du blé, son taux d'humidité, le taux d'extraction et la conduite au moulin (Hydro-bromatologie, 2020).

3-2-3 Examen microscopique:

Permet la détermination de la pureté par l'addition d'autres farines ou féculés. L'examen microscopique permet de déceler les farines étrangères d'après l'aspect des grains d'amidon. Il se pratique après élimination du gluten (Hydro-bromatologie, 2020).

On constate deux types d'amidon : l'amidon sphérique (Blé, seigle, orge, arachide) et l'amidon polyédrique plus ou moins régulier (Mais, riz, sarrasin, avoine, millet) (Hydro-bromatologie, 2020).

3-2-4 Taux d'humidité:

La teneur en eau (ou humidité ou titre en eau) est la quantité d'eau perdue par l'aliment lorsqu'on le place en équilibre avec une pression de vapeur d'eau nulle (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

La détermination de la teneur en eau des farines conditionne la précision des différents résultats analytiques qui sont rapportés à la farine desséchée (Hydro-bromatologie, 2020).

Le résultat est donné par la formule suivante :

$$H = \frac{P - P'}{P} * 100 + 0.3$$

Avec :

P : Prise d'essai de la farine ;

P' : poids du résidu ;

0,3 : Correctif pour tenir compte, dans le cas des farines, de l'humidité de l'atmosphère dans laquelle se fait la dessiccation (Hydro-bromatologie, 2020).

Les résultats sont exprimés en pourcentage d'humidité par rapport à la matière sèche. L'humidité est en générale comprise entre 12 et 16 % (Farine de blé tendre : H = 15 %) ; une valeur supérieure à 16% entraîne, si la température est suffisante, des fermentations et le développement de moisissures qui communiquent à la farine une odeur désagréable et provoque la formation de centres de fermentation plus ou moins agglomérés appelés matons (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016) (Hydro-bromatologie, 2020).

3-2-5 Dosage des cendres (Appréciation du taux d'extraction):

On appelle cendres les résidus minéraux incombustibles après incinération d'un produit dans des conditions bien déterminées et à une température comprise entre 550 °C et 900 °C (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

Ce test consiste en une incinération de la farine et une pesée du résidu. Si « p » représente le poids en grammes du résidu, la teneur en cendres dans l'échantillon en pourcentage vaut 20 p. Fréquemment, les cendres sont rapportées à 100 g de farine sèche, si H est le pourcentage d'humidité, la teneur en cendres exprimée en pourcentage est :

$$C = \frac{2000 * p}{100 - H}$$

Pour la farine du blé tendre, les cendres sont entre 0.30 et 0.90 % et suivent l'augmentation du taux d'extraction (Hydro-bromatologie, 2020).

3-2-6 Dosage de l'acidité:

L'acidité des farines renseigne sur l'état de conservation, l'âge et le taux d'extraction. On désigne par acidité sulfurique de la farine, l'acidité des substances extractibles par l'alcool éthylique à 95°. Elle est en grande partie due à l'acidité des acides gras formés par hydrolyse ou par oxydation des lipides. Le titrage s'effectue sur l'extrait alcoolique, au moyen d'une solution alcaline titrée en présence de phénol phtaléine. On retranche du résultat trouvé l'acidité apportée par le solvant et titrée conjointement (Hydro-bromatologie, 2020).

L'acidité d'une farine est exprimée, en gramme d'H₂SO₄ par 100 g de farine, suivant la formule ci-après :

- Pour la farine telle quelle : $Acidité = 0.0735(n - n')$
- Pour la farine sèche : $Acidité = 0.0735(n - n') \frac{100}{100-H}$

Avec :

n : nombre de mL de Soude 0,05N utilisé pour le dosage

n' : nombre de mL de soude 0,05N utilisé pour le blanc

H : pourcentage d'humidité de la farine (Hydro-bromatologie, 2020).

L'acidité d'une farine blanche (Taux d'extraction = 70 %), de mouture récente est voisine de 0,025 g dans 100 g de farine. Elle atteint 0,040 g dans 100 g de farine pour les farines à taux d'extraction supérieur à 70 % (Hydro-bromatologie, 2020).

Un chiffre supérieur à 0,070 g dans 100 g de farine pour une farine de blé tendre est une présomption d'altération, les qualités boulangères sont alors en nette régression (Hydro-bromatologie, 2020).

Le taux maximal d'acidité d'une farine blanche ordinaire est de 0,050 g dans 100 g de farine (taux rapporté à la matière sèche) (Hydro-bromatologie, 2020).

3-3 Caractéristiques biochimiques:

3-3-1 Teneur en matière grasse libre:

La méthode Soxhlet est la méthode de référence utilisée pour la détermination de la matière grasse dans les aliments solides déshydratés. C'est une méthode gravimétrique puisqu'on pèse l'échantillon au début et la matière grasse à la fin de l'extraction (Salghi R., 2004).

Le principe de ce test consiste en l'utilisation du Soxhlet pour l'extraction par l'éther de pétrole des matières grasses, ensuite élimination du solvant et la pesée du résidu ainsi obtenu (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

La teneur en matière grasse libre en pourcentage de masse de l'échantillon est calculée comme suit :

$$\text{Pourcentage des matières grasses libres} = \frac{M_1 - M_0}{E} * 100$$

Avec :

M_0 : La masse en grammes du ballon de Soxhlet.

M_1 : La masse en grammes du ballon et de la matière grasse après séchage.

E : La masse en gramme de la prise d'essai (masse de l'échantillon) (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

3-3-2 Teneur en protéines:

La teneur en protéines est déterminée par un appareil « NIRS (Near Infra Red System) » où les mesures sont faites en transmission ou en réflexion dans une plage spectrale en proche infrarouge [1400-2500 nm] d'un échantillon broyé. La détermination de cette teneur nécessite

un étalonnage préalable mémorisé dans un microprocesseur à l'aide d'un échantillon de composition connue et un traitement mathématique du spectre résultant de l'analyse de l'échantillon inconnu. Les résultats sont exprimés en pourcentage de protéine par rapport à la matière sèche (représentent la moyenne de 3 répétitions) (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016).

3-3-3 Dosage des sucres:

Ce dosage se fait suivant la méthode Duchâteau et Florkin, 1959 qui consiste à un pesage de 0,08 g de farine, qu'on place dans un Eppendorf et on laisse reposer toute une nuit dans un réfrigérateur. Ensuite, on retire l'Eppendorf, et on place la prise d'essai dans une centrifugeuse à la vitesse de 5000 tours /min pendant 10 min. à la fin de la centrifugation, on prend 100 µl de surnageant et on additionne 4 ml d'anthérone, on chauffe à 80 °C pendant 10 min dans un bain marie (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

Un blanc est préparé avec 100 µl d'eau distillée 4 ml d'anthérone chauffés à 80 °C pendant 10 min. Enfin on fait la lecture des absorbances à 620 nm (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

3-3-4 Dosage de l'amidon:

Le dosage de l'amidon est réalisé selon une méthode décrite par la FAO (1986) qui consiste à un pesage de 05 g de farine qu'on traite avec 25 ml d'une solution alcoolique d'hydroxyde de potassium à 08 % (40 g de KOH dissous dans 300 ml d'éthanol à 95 % puis diluée à 500 ml dans l'éthanol à 95 %). Puis, le mélange est mis dans un bain marie pendant 20 min avec agitation manuelle de temps à l'autre. Ainsi, les protéines sont hydrolysées et les lipides sont saponifiés (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

On place le mélange dans une centrifugeuse à 3000 tours/min pendant 5 min. Après centrifugation et décantation on élimine le surnageant et on lave le culot avec 12,5 % d'éthanol à 95 %, puis on procède à une deuxième centrifugation pendant 5 min à une vitesse de 3000 tours/min. on laisse décanter le mélange et on élimine le surnageant puis, on met 25 ml d'une solution d'acide chlorhydrique (un volume d'HCl 37 %, d = 1,19 pour un volume d'eau). On transfère 12,5 ml de la solution d'HCl chargée en amidon dans un erlenmeyer contenant 37,5 ml d'éthanol à 95 %. Bien mélanger et laisser reposer toute la nuit (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

Enfin, on filtre la solution et lave le filtrat qu'on va placer dans l'étuve à 75 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

La teneur en amidon M pour 100 g de farine humide est calculée selon la formule suivante :

$$M = \frac{(m_{fr} - m_f)}{m_p} * 2 * 100$$

Avec :

m_p : La masse de la prise d'essai.

m_f : La masse du papier filtre sec.

m_{fr} : La masse du papier filtre avec résidu d'amidon après séchage (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

Le facteur de 100 permet d'exprimer le résultat pour 100 g de farine humide. Ainsi, le facteur de correction 2 permet de rétablir la quantité d'amidon contenu dans la totalité de la prise d'essai (Benhoumar M., Boulkara S., 2010).

3-4 Caractéristiques technologiques:

3-4-1 Test de Pelshenke:

Ce test qualitatif permet de déterminer le temps nécessaire pour qu'une boule de pâte (mélange : farine + levure) trempée dans de l'eau sous l'effet de la levure et à 32 °C, éclate. Les boulettes gonflent, remontent en surface, puis au bout d'un certain temps se disloquent et retombent. Cet indice varie en fonction de nombreux paramètres : température, temps de pétrissage, type de levure, type de mouture, etc.

Ce test révèle la qualité de la farine : plus la durée d'éclatement est longue, plus la qualité des protéines est bonne (richesse en Gluten) (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016).

3-4-2 Test de sédimentation (SDS):

L'indice de sédimentation permet de donner une idée sur la force d'une farine. Il est basé sur la lecture du volume, en millilitre, du dépôt formé suite à une série d'agitations et au gonflement des protéines, dans des conditions bien définies, de 6 grammes la farine dans une solution à base de Sulfate Dodecyl de Sodium (SDS). Cet indice est déterminé par Axford et Redman (étude publiée dans Cereal Chemistry, 56 : 582-584 en 1979), son principe repose sur l'aptitude du gluten à gonfler en milieu aqueux et coaguler dans un milieu acide à l'aide d'une solution SDS-acide lactique. La valeur obtenue détermine donc la viscoélasticité du blé (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016).

3-4-3 Test de gluten humide et gluten sec:

La teneur en protéines est une qualité importante des farines recherchée par les industriels céréaliers pour son rôle important dans la formation de la pâte. Le dosage de gluten permet de connaître l'état de conservation, de déterminer la pureté et d'apprécier la valeur boulangère de la farine (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016) (Hydro-bromatologie, 2020).

Le gluten est le composé protéique le plus important de la farine. Ses deux principales protéines sont les gliadines et les gluténines dans des proportions variables. La variabilité du gluten tant en qualité qu'en quantité est grande et dépend de la variété de blé, son lieu de culture et les conditions climatiques. Le gluten joue un rôle essentiel dans les diverses fabrications. Il constitue l'armature de la pâte et lui communique son « nerf » ou sa « force », c'est-à-dire ses qualités mécaniques (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016) (Hydro-bromatologie, 2020).

Le dosage du Gluten repose sur son insolubilité dans l'eau chargée de sels et de la propriété qu'il possède de s'agglomérer lorsqu'on le malaxe sous un courant d'eau qui élimine les autres constituants (Hydro-bromatologie, 2020).

Le Gluten est dosé après séparation manuelle de l'amidon, en pétrissant une petite quantité de pâte sous un filet d'eau. L'amidon est peu à peu entraîné par l'eau et il ne reste finalement qu'une masse compacte blanc crème, souple, extensible, et très élastique. Cette masse plastique obtenue est pesée à l'état humide, puis après dessiccation. Au cours de l'extraction, il convient de noter l'aspect et la plasticité du Gluten (BOUKARBOUA A., BOULKROUN M.B., 2016) (Hydro-bromatologie, 2020).

Plus on se rapproche de l'enveloppe et plus le gluten augmente. Pour une farine de blé tendre, le poids du gluten sec est entre 8 et 12 % (Hydro-bromatologie, 2020).

Au cours de l'opération d'extraction, il y a lieu de noter les caractères du gluten : Facilité d'obtention, élasticité, consistance et couleur. Cet aspect qualitatif de l'extraction rend de précieux services pour apprécier la qualité de la farine :

- Le gluten d'une farine de bonne qualité s'extrait facilement, il est blanc-crème, très élastique et a une odeur agréable. Après séchage, il conserve sa couleur et augmente considérablement de volume.
- Un blé tendre fournit du gluten plus élastique qu'un blé dur.

- Une farine altérée provenant de blés germés donne un gluten qui s'agglomère difficilement.
- Le gluten d'une farine vieille mousse (aspect de choux fleurs) et a une odeur de moisi.
- L'addition de seigle ou d'orge à la farine de blé ne permet pas l'extraction complète du gluten (8 à 9 % de seigle rendent impossible l'extraction du gluten), celui-ci est alors visqueux et savonneux.
- Le gluten est coloré par la présence de farines étrangères :
 - Noir verdâtre : lentilles
 - Rose : fèves
 - Brun-rougeâtre : orge
 - Noir : seigle (Hydro-bromatologie, 2020).

3-5 Caractéristiques microbiologiques:

Certes, la prolifération des micro-organismes n'est pas toujours nuisible, mais la marge de sécurité entre l'innocuité et la nocivité est faible. Pour cela il est nécessaire de procéder au contrôle microbiologique des aliments, tout comme la farine du blé tendre, pendant leur fabrication et avant leur distribution (Ennadir J. et al., 2012).

Le dénombrement de la flore microbienne associée aux farines peut être réalisé par la méthode standard (ensemencement en profondeur). Elle consiste à introduire aseptiquement 10 g de chaque échantillon de farine dans des flacons contenant 90 mL d'eau physiologique stérile (0,85 % m/v). Des dilutions décimales allant de 10^{-1} jusqu'à 10^{-6} sont préparées à partir du même diluant et ensuite ensemencées dans les milieux de culture en boîtes. Après incubation, les boîtes contenant entre 30 et 300 colonies sont maintenues pour le dénombrement (Ennadir J. et al., 2012).

3-5-1 Dénombrement de la flore d'intérêt hygiénique:

3-5-1-a Énumération de la flore mésophile aérobie totale (FMAT):

Le dénombrement de la FMAT peut être réalisé sur la gélose dite « plate count agar ». La lecture se fait après 24 h d'incubation à 30 °C (Alp A,et al,2006).

3-5-1-b Énumération des coliformes:

L'énumération des coliformes peut être effectuée sur la gélose au désoxycholate lactose. Les colonies rouges qui fermentent le lactose et ayant un diamètre de plus de 0,5 mm, apparaissant après 24 h d'incubation à 37 °C pour les coliformes totaux, et à 44 °C pour les coliformes fécaux sont comptées (Alp A,et al,2006).

3-5-1-c Énumération des staphylocoques pathogènes:

Le dénombrement des staphylocoques présumés pathogènes peut être réalisé sur la gélose de Baird–Parker. Après 48 h d’incubation à 37 °C, les colonies noires avec marge blanche sont comptées (Alp A,et al,2006).

3-5-2 Dénombrement de la flore d’intérêt sanitaire:

3-5-2-a Détection de Salmonella:

La détection des salmonelles peut être réalisée en suivant les recommandations de la norme internationale ISO 1990. En Effet, 25 g de chaque échantillon sont dilués dans 225 mL d’eau peptonée tamponnée (EPT). Après 18 h d’incubation à 37 °C, 1 mL d’EPT est transféré dans un tube contenant 9 mL de bouillon de Rappaport Vassiliadis (RV) et incubé à 42 °C pendant 24 h. À l’aide d’une anse, une boucle est prélevée à partir de RV et ensemencée par épuisement à la surface de la gélose de Hektoen. Les boîtes sont incubées à 37 °C pendant 24 h, les colonies suspectes de salmonelles sont caractérisées par une couleur bleu–vert ou verte avec ou sans centre noir (Alp A,et al,2006).

3-5-2-b Énumération des Clostridium sulfito-réducteurs (CSR):

Le dénombrement des CSR peut être réalisé sur le milieu SPS. Des tubes contenant 15 mL de SPS sont ensemencés à partir de la solution mère qui a subi au préalable un traitement thermique à 80 °C pendant 10 min en vue de détruire la forme végétative et activer les spores de *Clostridium*. Ensuite, l’ensemble est incubé à 30 °C pendant 24 à 48 h. Seules les colonies noires sont comptées (Alp A,et al,2006).

3-5-2-c Détection de Listeria monocytogenes:

Pour le dénombrement de *L. monocytogenes*, on peut procéder comme suit : 10 g de l’échantillon sont ajoutés à 100 mL de bouillon Frazer 1/2 stérile. Le flacon est incubé à 37 °C pendant 24 h. Ensuite, 1 mL des cultures obtenues sur le milieu Frazer 1/2 est inoculé sur le bouillon Frazer complet en tube de 10 mL. Ce dernier est incubé à 37 °C pendant 24 h. Les cultures obtenues sur le milieu Frazer complet sont repiquées sur milieu PALCAM par isolement en surface de la gélose. Le milieu est ensuite incubé à 37 °C pendant 24 h. Les colonies suspectes de *L. monocytogenes* apparaissent noires avec des pseudo-racines. La confirmation est réalisée sur le milieu chromogène et la Galerie Api *Listeria* (Alp A,et al,2006).

3-5-3 Dénombrement de la flore d'intérêt technologique:

3-5-3-a Énumération de la flore fongique (levure et moisissure):

Le dénombrement des levures et des moisissures peut être effectué sur le milieu « potato dextrose agar » fortement acidifié (entre 3,5 et 4) par l'acide lactique et incubé à 25 °C pendant 72 h pour les levures et 5 à 7 jours pour les moisissures (Alp A, et al, 2006).

3-5-3-b Énumération des bactéries lactiques:

L'énumération des bactéries lactiques peut être effectuée sur milieu de Man-Rogosa-Sharpe. L'incubation est effectuée à 30 °C pour les espèces mésophiles et à 45 °C pour les espèces thermophiles pendant 48 h. Après incubation, les colonies rondes ou lenticulaires sont dénombrées (Alp A, et al, 2006).

4- Analyse mycologique du blé tendre et de sa farine:

Les moisissures constituent les micro-organismes les plus significatifs et les seuls à pouvoir représenter, pour les grains de blé et les farines, un danger réel dans les conditions habituelles d'activité de l'eau de ces produits (altération des propriétés organoleptiques, accumulation de mycotoxines) (TANTAOUI EL ARAKI A., 2017).

4-1 Énumération des propagules de moisissures dans les farines:

Les moisissures se trouvent sous différentes formes susceptibles de donner naissance à un nouveau mycelium dans les milieux de culture favorables : spores de toutes sortes, fragments de filament, touffes de filaments, etc. Chacun de ces éléments est une unité de propagation ou propagule (TANTAOUI EL ARAKI A., 2017).

Cette technique consiste à suspendre une quantité donnée de farine dans un milieu liquide dispersant, à ensemercer des dilutions successives de cette suspension mère dans un milieu nutritif gélosé favorable puis, après incubation, à compter le nombre de « thalles » qui proviennent, en principe, chacun d'une propagule (TANTAOUI EL ARAKI A., 2017).

4-2 Recherche de moisissures potentiellement dangereuses sur les grains de blé tendre:

Un grain de céréale peut porter de nombreuses spores de moisissures qui, tout en étant nombreuses, ne représentent aucun danger, ni pour la stabilité du produit au stockage, ni pour la santé du consommateur. Les espèces réellement dangereuses sont celles capables de se développer sur les grains dans les conditions de stockage habituelles. Dans le blé tendre, elles commencent généralement leur développement au niveau du sillon (TANTAOUI EL ARAKI A., 2017).

Pour les mettre en évidence, il faut débarrasser le grain des espèces sans intérêt qui accompagnent normalement les poussières de surface. Si elles n'étaient pas enlevées, ces moisissures sans intérêt gêneraient, par leur croissance rapide dans les milieux de laboratoire, le développement des espèces dangereuses (TANTAOUI EL ARAKI A., 2017).

Cette manipulation consiste à laver soigneusement les grains de leurs poussières de surface pour enlever les moisissures sans intérêt, puis à disposer les grains à la surface d'un milieu nutritif gélosé approprié dans des boîtes de Petri et, après incubation, à observer le développement éventuel de moisissures, puis à les isoler pour étude et identification éventuelle (TANTAOUI EL ARAKI A., 2017).

4-3 Identification des principaux genres de moisissures:

Parmi les principaux genres de moisissures qui comportent des espèces dangereuses pour la stabilité des céréales et de leurs dérivés au stockage et/ou pour la santé du consommateur on compte *Aspergillus* et *Penicillium* (TANTAOUI EL ARAKI A., 2017).

L'identification de ces 2 genres repose essentiellement sur l'observation microscopique de leurs cultures ou de prélèvements de cultures. Il s'agit notamment de noter :

- la nature cloisonnée ou non des filaments végétatifs ;
- la forme et le cloisonnement éventuel du conidiophore ;
- la forme spécifique de la tête conidienne ;
- la forme, la taille et le caractère unicellulaire ou pluricellulaire des conidies ;
- d'autres aspects spécifiques à chaque genre (TANTAOUI EL ARAKI A., 2017).

Tableau III.2 : Caractéristiques des milieux spécifiques pour la détermination des genres *Aspergillus* et *Penicillium* (Pitt et Hocking, 2009)

Milieux de culture	T° d'incubation	Activité de l'eau	Caractéristique
Czapek Dox Agar	25 °C	Elevée et c'est dû à sa composition à base minérale	Vitesse de croissance qui varie en fonction de l'activité de l'eau à une température constante
25 % Glycérol Nitrate Agar	25 °C	Basse et c'est dû au glycérol capteur d'eau dans le milieu de culture	Vitesse de croissance qui varie en fonction de l'activité de l'eau à une température constante
Czapek Yeast Extract Agar	5 °C		Vitesse de croissance qui varie en fonction de deux températures différentes
Czapek Yeast Extract Agar	37 °C		
Malt Extract Agar	25 °C		Informe sur la couleur du thalle

4-5 Détection des moisissures dans un échantillon de farine:

La mise en évidence des moisissures dans une farine nécessite l'utilisation de techniques particulières. Le simple examen microscopique de l'échantillon n'a pratiquement aucun intérêt. Il est préférable de lui substituer une mise en culture des germes fongiques présents (MOREAU Claude, 1970).

L'obtention d'un « échantillon moyen » peut être réalisée par homogénéisation dans un mélangeur ou par secouage manuel de préférence en présence d'un agent de dispersion (sable). Cette homogénéisation se fait soit à sec, soit dans de l'eau légèrement peptonée ou salée. Cependant, au lieu d'homogénéiser, il est souvent préférable de multiplier les

prélèvements et les analyses pour avoir un reflet plus fidèle de la mycoflore (MOREAU Claude, 1970).

Les champignons des farines ayant souvent des exigences hydriques propres, les milieux de culture usuels, tant synthétiques que naturels, sont insuffisants pour exprimer la totalité de la mycoflore. Il est alors nécessaire d'utiliser des milieux de culture à pression osmotique élevée, ce qui se réalise soit par un enrichissement des solutions nutritives en glucides (de 10 à 100 fois), soit par adjonction de chlorure de sodium ou par les deux à la fois (MOREAU Claude, 1970).

L'ensemencement direct de farine ne révèle que les espèces les plus compétitives dans les conditions de culture utilisées. Par contre, pour mieux séparer les divers champignons et réaliser une évaluation quantitative, il est recommandé de pratiquer une série de dilutions successives (MOREAU Claude, 1970).

Sur la figure III.2 est présenté un schéma d'un exemple d'une méthode d'analyse quantitative des moisissures d'une farine :

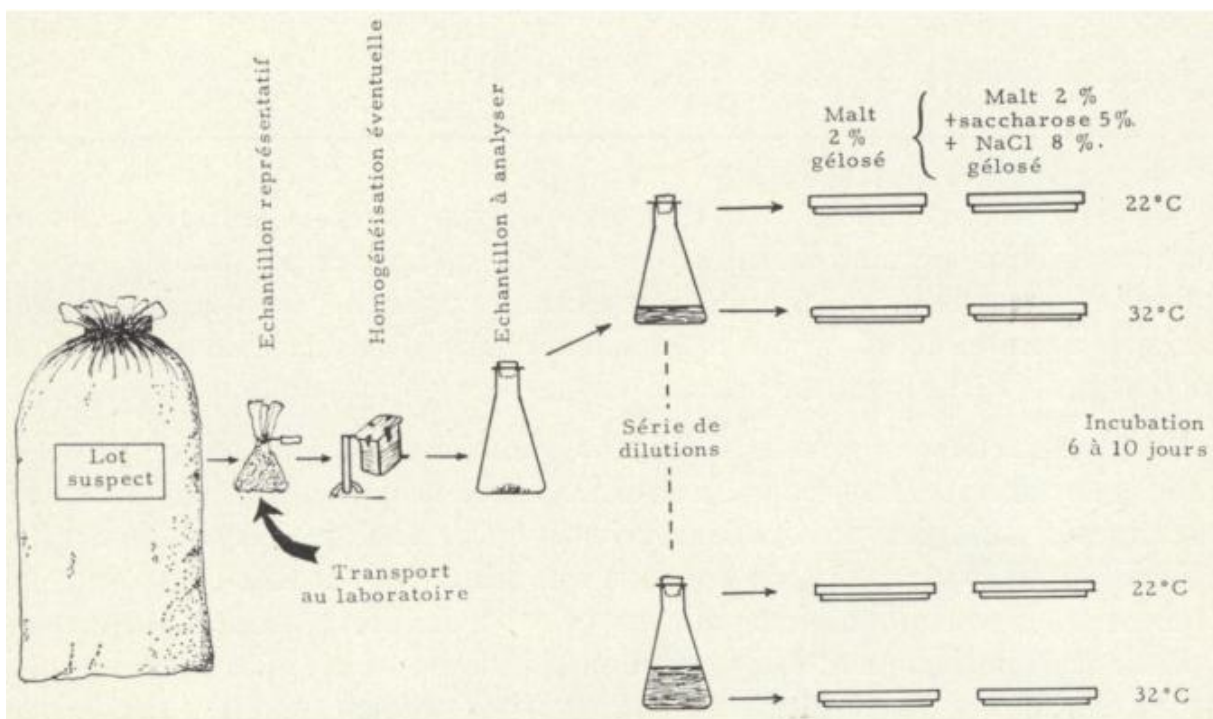


Figure III.2 : Schéma d'un exemple d'une méthode d'analyse quantitative des moisissures d'une farine (MOREAU Claude, 1970).

5- Analyses mycotoxicologiques:

Il a été rapporté que la plupart des microorganismes contaminant un lot de blé donné occupent la partie externe du grain, et que seulement quelques espèces sont situées à l'intérieur (Laca et al., 2006). Selon Forder (1997) et Bainotti et Perez (2000), les céréales débarrassées de leurs enveloppes sont d'un point de vue microbiologique, moins contaminées. Ainsi, il est nécessaire de connaître le devenir d'une telle charge mycologique sur les produits dérivés tels que la farine (Naoufal Tahani et al., 2008).

Les méthodes chimiques d'extraction, de purification et de dosage des mycotoxines, utilisent le schéma analytique qui correspond en première étape en une extraction (liquide/liquide ou bien solide/liquide), suivie d'une étape de purification de l'extrait, suivie d'une étape de concentration ou condensation et puis l'étape de détection par chromatographie.

6- Réglementation de l'OTA:

En ce qui concerne l'ochratoxine A, la réglementation concerne en général l'alimentation humaine et en particulier les céréales notamment le blé tendre. En effet, dans le cadre de la directive 1881/2006/CE (abrogeant le règlement 466/2001/CE) pour la fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires, des teneurs maximales ont été fixées pour l'OTA afin de limiter autant que possible l'exposition humaine (Tableau III.3) (MEHREZ A., 2008).

Tableau III.3 : Teneurs maximales en ochratoxine A dans les céréales et le blé exprimées en $\mu\text{g}/\text{kg}$ (AFSSA, 2006)

Matrice alimentaire	Teneur maximale ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
Grains de céréales brutes (y compris le riz brut et le sarrasin)	5
Produits dérivés des céréales (y compris les produits de céréales transformés et les grains de céréales destinés à la consommation directe)	3
Préparation à base de céréales pour enfants en bas âge et aliments diététiques destinés à des fins médicales spéciales spécifiquement pour les nourrissons	0.5

Aucune teneur maximale en OTA n'est encore fixée dans les aliments pour animaux. Cependant, la directive européenne (2006/576/CE) recommande d'appliquer des teneurs

maximales en OTA dans les matières premières et aliments destinés à l'alimentation animale (MEHREZ A., 2008).

7- Dosage de l'AFB1 par HPLC-FLD:

L'appareil HPLC permet une détection par fluorescence ($\lambda_{ex} = 364 \text{ nm}$ et $\lambda_{em} = 440 \text{ nm}$) et par UV ($\lambda = 225 \text{ nm}$ et 362 nm). La colonne analytique utilisée est de type Uptisphere 5 μm C18 ODB (150 x 4,6 mm) conditionnée à 25°C avec une pré-colonne de garde de 10 x 4 mm. Un volume de 80 μl a été injecté en utilisant un auto-injecteur.

La phase mobile est constituée d'un mélange d'acide phosphorique 0.1% et du méthanol/acétonitrile (50:50) à un débit de 1 ml.min⁻¹. Le temps de rétention était alors de l'ordre de 6 minutes (André EL KHOURY, 2007).

Discussion

1- Normes alimentaires internationales pour la farine de blé:

En collaboration avec la FAO, l'OMS est chargée d'évaluer, pour l'être humain, les risques liés à la présence de mycotoxines dans les aliments et de recommander une protection suffisante. Les gouvernements et la Commission du Codex Alimentarius (l'organisme intergouvernemental qui fixe les normes pour l'alimentation) se servent des évaluations du risque des mycotoxines dans les aliments faites par le Comité mixte FAO-OMS d'experts des additifs alimentaires (CMEAA) pour fixer les teneurs maximales dans les aliments (OMS, 2022).

Le CMEAA, groupe mixte ad-hoc OMS/FAO, se compose d'experts indépendants et internationaux qui procèdent à des examens scientifiques de toutes les études disponibles et des autres données pertinentes sur les mycotoxines spécifiques. Ces évaluations du risque sanitaire peuvent aboutir soit à une dose journalière tolérable maximale (exposition). Ces doses journalières tolérables servent à établir les teneurs maximales en mycotoxines dans les denrées alimentaires. Pour les mycotoxines, elles sont très faibles en raison de leur grande toxicité. Pour les aflatoxines par exemple, les teneurs maximales fixées par le Codex dans divers fruits secs oléagineux, les grains, les figues séchées et le lait vont de 0,5 à 15 µg/kg (un µg correspondant à un milliardième de kilogramme) (OMS, 2022)

La présente norme s'applique à la farine de blé destinée à la consommation humaine et dérivée du blé ordinaire, *Triticum aestivum L.* ou de blé ramifié, *Triticum compactum Host.*, ou tout mélange de ces derniers, préemballée et prête à la vente aux consommateurs ou destinée à être utilisée dans d'autres produits alimentaires (Codex Alimentarius, 2019).

1-2 Facteurs de qualité – critères généraux:

La farine de blé et tout ingrédient lui étant éventuellement ajouté doivent être sains et propres à la consommation humaine.

La farine de blé doit être exempte d'odeurs et de goûts anormaux ainsi que d'insectes vivants.

La farine de blé doit être exempte de souillures (impuretés d'origine animale, y compris les insectes morts) en quantités susceptibles de présenter un risque pour la santé.

1-3 Facteurs de qualité – critères spécifiques:

Tableau III.4 : Critères spécifiques des facteurs de qualité de la farine de blé tendre

Facteur	Concentration maximale
Teneur en eau	15.5 % m/m
Amylase fongique à partir d' <i>Aspergillus oryzae</i>	BPF
Enzyme protéolytique à partir d' <i>Aspergillus oryzae</i>	BPF
Métaux lourds	Doit être exempte de métaux lourds en quantités susceptibles de présenter un risque pour la santé humaine.
Résidus de pesticides	Doit être conforme aux limites maximales de mycotoxines fixées par la Commission du Codex Alimentarius pour ce produit.

2-Normes alimentaires nationales pour la farine de blé tendre (Journal officiel de la république algérienne, 1992) «La farine de panification est le produit de la mouture de graines de céréales aptes à la panification et préalablement nettoyées, sans autre modification que la soustraction partielle ou totale des germes et enveloppes, la teneur en eau doit être inférieure ou égale à 15.5 %, l'indice de chute entre 180 et 280 et l'indice de Zélény de 22 à 30.

La dénomination « farine » ou « farine de panification », sans autre qualificatif, désigne la farine de blé tendre *Triticum aestivum*.

Dans tous les autres cas, cette dénomination devra être suivie de l'indication de l'espèce ou des espèces végétales dont la farine est issue. En cas de mélange, la proportion de chacun des composants, devra être indiquée.

La farine de panification pourra recevoir l'adjonction à titre d'adjuvants, de farine de fèves dans proportion ne dépassant pas 2 % et de produits maltés dans une proportion n'excédant pas 0.3 %.

Sauf dispositions législatives ou réglementaires contraires, la farine de panification doit être indemne de tous corps étrangers.

3-Approches de décontamination

Pour pouvoir lutter contre les moisissures et les mycotoxines, il faut savoir à quel moment elles se développent. Ainsi, il est possible de définir six moments privilégiés au cours de l'élaboration d'un produit : lors de la culture, de la récolte, du stockage, de la transformation, de l'alimentation des animaux et enfin lors de la consommation par l'être humain (NGUYEN MINH TRI, 2007).

Les moyens de lutte pour chaque période définie sont consignés dans le tableau II.3 (liste non exhaustive).

Tableau II.3 : Méthodes de lutte contre la contamination (NGUYEN MINH TRI, 2007)

Période définies	Solutions proposées
Au champ	<ul style="list-style-type: none"> - créer des plantes résistantes - limiter le développement par l'emploi de fongicides - arrosage adapté - apports en minéraux
A la récolte	<ul style="list-style-type: none"> - veiller à la maturité du grain - inspection visuelle pour éliminer les éléments abîmés - éviter les récoltes en temps humide
Au stockage	<ul style="list-style-type: none"> - contrôle périodique - maintenir une bonne température - contrôler l'humidité - détruire les produits contaminés - une bonne aération des silos.
A la transformation	<ul style="list-style-type: none"> - contrôle mais, plus au niveau des mycotoxines que des moisissures.
Dans l'alimentation des animaux	<ul style="list-style-type: none"> - tests de contamination, puis décontamination si nécessaire
A la consommation	<ul style="list-style-type: none"> - éliminer les aliments contaminés - jouer sur la cuisson

Conclusion générale

Conclusion générale:

Notre travail a eu pour objectif de démontrer que les aspects qualitatifs et sanitaires des céréales et de leurs dérivés sont très importants et qu'ils jouent un impact crucial sur la sécurité alimentaire notamment dans le cas du blé et particulièrement du blé tendre qui est l'une des céréales les plus consommées et cultivées pour l'alimentation humaine.

Pour cette raison, le respect de la réglementation et des bonnes pratiques agroindustrielles reste le meilleur moyen de prévention et de lutte contre la contamination microbologique et des sous-produits qui en résulte tel que les mycotoxines.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A. Riba, S. Mokrane, F. Mathieu, A. Lebrihi, N. Sabaou. Mycoflora and ochratoxin A producing strains of *Aspergillus* Algerian wheat. *International Journal of Food Microbiology*. Vol 122. (2008). 85–92.

ABDANI Ikram, BAKHTI Asma. Composition biochimique et nutritionnelle de différentes variétés de blé commercialisé en Algérie. Mémoire de master. Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem. 2017.

AFSSA. Rapport synthétique de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments. Evaluation des risques liés à la présence de mycotoxines dans la chaîne alimentaire humaine et animale, décembre 2006.

Alban Gauthier. Les mycotoxines dans l'alimentation et leur incidence sur la santé. Sciences pharmaceutiques. 2016. ffdumas-01315198.

Amar Riba, Noureddine Bouras, Salim Mokrane, Florence Mathieu, Ahmed Lebrihi, Nasseridine Sabaou. *Aspergillus* section Flavi and aflatoxins in Algerian wheat and derived products. *Food and Chemical Toxicology*. Vol 48. (2010). pp. 2772-2777.

André EL KHOURY. Champignons Mycotoxinogènes et Ochratoxine A (OTA) et Aflatoxine B1 (AFB1) dans les vignobles libanais : Occurrence et Origine. Thèse de doctorat. INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE. 2007.

Basílico M. Z., Basílico J. C. Inhibitory effects of some spice essential oils on *Aspergillus ochraceus* NRRL 3174 growth and ochratoxin A production. *Letters in Applied Microbiology*. Vol 29. N° 4. (1999). 238–241.

Benhoumar Mimouna, Boukara Samia. L'analyse Biochimique des produits de la mouture des blés (tendre et dur). Mémoire d'ingénieur. Université de Jijel. 2010.

Boudreau Armand, Ménard Germain. Le blé : éléments fondamentaux et transformation. 1992.

BOUKARBOUA Amira, BOULKROUN Meriem Bouchra. Appréciation de la qualité technologique des farines commerciales par des tests indirects. Mémoire de master. Université des Frères Mentouri Constantine. 2016.

Boulkour Assia, Lamri Noura et Tazir Nadia. Evaluation de la qualité des grains et des farines de quatre variétés de blé tendre. Mémoire d'ingénieur. Université de JIJEL. 2009.

BOURAK Kaoutar. SELECTION ASSISTEE PAR MARQUEURS SNP ET ETUDE PHENOTYPIQUE DU BLE TENDRE (*Triticum aestivum* L.). Mémoire de fin d'études. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès. 2018.

Calvel R. 1984. La boulangerie moderne. 2^{ème} édition. Saint.Germain. Paris. Pp 13-72.

Chabasse, D., Bouchara, J.P., de Gentile, L., Brun, S., Cimon, B., Penn, P. 2002. Les moisissures à intérêt médical. Cahier de formation N° 25. Bioforma 230 bd raspail 75014 Paris.

CHETMI Dalel. Etude comparative de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf) et analyse diallèle de leurs hybrides F1. Thèse de magister. Institut National d'Agronomie Alger. 2009.

Clément Debiton. Identification des critères du grain de blé (*Triticum aestivum* L.) favorables à la production de bioéthanol par l'étude d'un ensemble de cultivars et par l'analyse protéomique de lignées isogéniques waxy. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal. 2010.

Codex Alimentarius Commission. (2004). Code of Practice for the prevention and reduction of aflatoxin contamination in peanuts. CAC/RCP, 55.

Codex Alimentarius. NORME POUR LA FARINE DE BLÉ. CXS 152-1985. Adoptée en 1985. Révisée en 1995. Amendée en 2016, 2019.

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.

Feillet Pierre. Le grain de blé : Composition et utilisation. Editions Quae. 2000.

FranceAgrimer. Marché du blé dur France, Union européenne, Monde (2019-2020). Edition janvier 2020.

Gourama, H., Bullerman, L.B. *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus*, aflatoxigenic fungi of concern in foods and feed – a review. J. Food Protect. Vol 58. (1995). 1395–1404.

Guy LEYRAL, Elisabeth VIERLING, 2007, microbiologie et toxicologie des aliments : hygiène et sécurité alimentaires, 4ème édition. Rueil-Malmaison : Doin ; Bordeaux : CRDP d'Aquitaine, (Biosciences et techniques : Sciences des aliments).

Hubert B., Rosegrant M., van Boekel M.A.J.S., Rodomiro Ortiz R. The future of food: scenarios for 2050. *Crop Science*. Vol 50. (2010). 33–50.

Hussein S. Hussein, Jeffrey M. Brasel. Toxicity, metabolism, and impact of mycotoxins on humans and animals. *Toxicology*. Vol 167. N° 2. (2001). 101–134.

Hydro-bromatologie. ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DES FARINES ALIMENTAIRES. Cours. Université Badji Mokhtar Annaba. 2020.

J. POTUS et P. SUCHE. Les problèmes de microbiologie en meunerie. *Industries des Céréales*. Mars-Avril 1989.

JECFA (Joint expert committee on food and additives), 1997. Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants. Forty-sixth Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives 1996. WHO Technical Report Series 868. Geneva: World Health Organization.

Jihane Ennadir, Rachida Hassikou, Farida Ohmani, Jamila Hammamouchi, Fatima Bouazza, Aicha Qasmaoui, Zakaria Mennane, Amina Ouazzani Touhami, Reda Charof et Khadija Khedid. Qualité microbiologique des farines de blé consommées au Maroc. *Canadian Journal of Microbiology*. Vol 58. (2012). 145–150.

Journal officiel de la république algérienne n°2. 8 janvier 1992. Page 44.

Kabak B., Dobson A. D., Var I. Strategies to Prevent Mycotoxin Contamination of Food and Animal Feed: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Vol 46. N° 8. (2006). 593–619.

Kellou Rym. Analyse du marché algérien du blé dur et les opportunités d'exportation pour les céréaliers français dans le cadre du pôle de compétitivité Quali-Méditerranée. Le cas des coopératives Sud Céréales, Groupe coopératif Occitan et Audecoop. Série « Master of Science ». N° 93. 2008.

KERMICHE Meryem. Caractérisation de certaines souches microbiennes évoluant dans le blé fermenté et mise en évidence de leurs activités enzymatiques. Mémoire de magister. UNIVERSITE CONSTANTINE 1. 2013.

L'atlas sociologique mondial. <https://atlasocio.com/>. Consulté le 05/06/2021.

Loucif Linda. Etude du comportement variétal du blé dur (*Triticum durum* Desf.) vis-à-vis du nématode à kystes des céréales *Heterodera avenae* Woll. (Nematoda, Heteroderidae) dans la région de Batna en vue de l'amélioration de cette culture. Thèse de doctorat. Université El Hadj Lakhdar Batna. 2015.

Mathew Shiju., Thomas George., Tufail Ahmad. An Evaluation of the fungi isolated from sub-epidermal region of post-harvested stored wheat grains. *Nepal Journal of Biotechnology*. Vol 1. N° 1. (2011). 9-13.

McKevith, B. Nutritional aspects of cereals. *Nutrition Bulletin*. Vol 29. (2004). 111-142.

MEHREZ Amel. Effets du radio traitement par les rayonnements gamma sur la décontamination et la cytotoxicité d'une mycotoxine : l'Ochratoxine A. Mémoire de master. UNIVERSITE 7 NOVEMBRE A CARTHAGE. 2008.

METIDJA Houda Imane. Evaluation biologique de trois molécules herbicides antidicotylédones sur la culture du blé dur dans les conditions agro-climatiques du Haut-Cheliff. Mémoire de Master. Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana. 2020.

Ministère de l'agriculture et de développement rural. <http://madrp.gov.dz/>. Consulté le 25/05/2021.

MOREAU Claude. LES MOISSURES DES FARINES PANIFIABLES. *Annales de la nutrition et de l'alimentation*. Vol 24. (1970). 117-127.

Nancib Aicha. Microbiologie appliquée – Chapitre IV : Microbiologie alimentaire. Cours. Université Ferhat Abbas Sétif. 2019/2020.

Naoufal Tahani, Hanae Serghini-Caid, Malika Ouzouline et Ahmed Elamrani. Mycologie du blé tendre : qualité technologique du grain et conséquences sur les produits finis. *Reviews in Biology and Biotechnology*. Vol 7, No 1. Janvier 2008. Pages 27-32.

NEDJAH Imene. Changements physiologiques chez des plantes (Blé dur *Triticum durum* Desf.) exposées à une pollution par un métal lourd (plomb). Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. 2015.

NGUYEN MINH TRI. IDENTIFICATION DES ESPÈCES DE MOISSURES, POTENTIELLEMENT PRODUCTRICES DE MYCOTOXINES DANS LE RIZ

COMMERCIALISE DANS CINQ PROVINCES DE LA REGION CENTRALE DU VIETNAM - ETUDE DES CONDITIONS POUVANT REDUIRE LA PRODUCTION DES MYCOTOXINES. Thèse de doctorat. INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE. 2007.

NOUREDDINE AZZI. Altération des aliments : Introduction à la microbiologie alimentaire. Cours. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. 2019/2020.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. <http://www.fao.org/home/fr>. Consulté le 19/05/2021.

[Organisation Mondiale de la Santé. https://www.who.int/fr](https://www.who.int/fr). Consulté le 20/01/2022.

Alp,A,Vural, A, Erkan, M,E, et Alp, S,Y, 2006, The microbiological and physico-chemical quality properties of wheat samples.

Petersson S., Schnürer J. Biocontrol of mold growth in high-moisture wheat stored under airtight conditions by *Pichia anomala*, *Pichia guilliermondii*, and *Saccharomyces cerevisiae*. Appl. Environ. Microbiol. Vol 61. N°3. (1995). 1027-1032.

Pildain, M.B., Frisvad, J.C., Vaamonde, G., Cabral, D., Varga, J., Samson, R.A. Two novel aflatoxin-producing *Aspergillus* species from Argentinean peanuts. Int. J. Syst. Evol. Microbiol. Vol 58. (2008). 725–735.

Pitt, John I., Hocking, Ailsa D. Fungi and Food Spoilage. Blackie Academic & Profesional. 2009.

Pohland, A. E., Nesheim, S., Friedman, L. Ochratoxin A: a review. Pure and Applied Chemistry. Vol 64. N° 7. (1992). 1029-1046.

Rhian B.Cope. Veterinary Toxicology Basic and Clinical Principles. Third Edition. Academic press. 2018.

S. Catherine Bezuidenhout, Wentzel C. A. Gelderblom, Charles P. Gorst-Allman, R. Marthinus Horak, Walter F. O. Marasas, Gerhard Spiteller, and Robert Vleggaar. Structure Elucidation of the Fumonisin, Mycotoxins from *Fusarium moniliforme*. J. Chem. Soc. Commun. Vol 11. (1988). 743-745.

Salghi R. 2004. Analyse physico-chimique des denrées alimentaires. Ecole nationale des sciences appliquées d'Agadir. Cours. P 19.

Saliha Zebiri, Salim Mokrane, Carol Verheecke-Vaessen, Elodie Choque, Hocine Reghioui, Nasserline Sabaou, Florence Mathieu & Amar Riba. Occurrence of ochratoxin A in Algerian wheat and its milling derivatives. TOXIN REVIEWS. 2018.

Samson RA, Hoekstra ES, Frisvad JC, Filtenborg O.1995, Introduction to food-borne fungi. Baarn: Centraalbureau voor Schimmelcultures.

Samson, R.A., Hong, S.B., et Frisvad, J.C. Old and new concepts of species differentiation in *Aspergillus*. Med. Mycol. Vol 44. (2006). 133–148.

Sauer D.B., Storey C.L., Ecker O., Fulk D.W. Fungi in U.S. Export wheat and corn. Postharvest Pathology and Mycotoxins. Vol 72. N° 11. (1982). 1449-1452.

SOLTNER Dominique. Les grandes productions végétales. 20^{ème} édition. 2005

Surget A., Barron, C. Histologie du grain de blé. Industrie des céréales. N° 145. (2005). 4-7.

TANTAOUI EL ARAKI Abdelrhafour. Analyse mycologique des blés et des farines. Support de formation. 2017.

Wu M. T., Ayres J. C. Effects of dichlorvos on ochratoxin production by *Aspergillus ochraceus*. Journal of Agricultural and Food Chemistry. Vol 22. N° 3. (1979). 536-541.

Yannick Carel. Marché mondial : le blé dur français a des places à prendre. Perspectives agricoles. N° 446. Juillet-Aout 2017.

Zillinsky F.J. Common diseases of small grain cereals. A guide to identification. CIMMYT. (1983).