



HAL
open science

Qualité sanitaire de l'ensilage de maïs et ses conséquences en production laitière

Estelle Genottin

► **To cite this version:**

Estelle Genottin. Qualité sanitaire de l'ensilage de maïs et ses conséquences en production laitière. Médecine vétérinaire et santé animale. 2024. dumas-04836868

HAL Id: dumas-04836868

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04836868v1>

Submitted on 13 Dec 2024

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

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

ANNEE 2024 THESE : 2024 – TOU 3 – 4120

QUALITE SANITAIRE DE L'ENSILAGE DE MAÏS ET SES CONSÉQUENCES EN PRODUCTION LAITIÈRE

THESE D'EXERCICE

pour obtenir le titre de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

DIPLOME D'ÉTAT

*présentée et soutenue publiquement
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse
par*

GENOTTIN Estelle, Claire

24

Directeur de thèse : M. Jean-Denis BAILLY

JURY

PRESIDENT :

M. Renaud MAILLARD

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

ASSESEURS :

M. Jean-Denis BAILLY

M. Pedro Henrique DIDIMO IMAZAKI

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

Liste des directeurs/assesseurs de thèse de doctorat vétérinaire

Directeur : Professeur Pierre SANS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie, thérapeutique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et industrie des aliments d'origine animale*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, statistiques, modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie pathologique*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la reproduction, endocrinologie*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du bétail et des animaux de basse-cour*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie médicale animale et comparée*

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, anatomie pathologique*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootecnie*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et thérapeutique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation animale*

PROFESSEURS 2^{ème} CLASSE

- Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des équidés et des carnivores*
- M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, imagerie médicale*
- M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
- Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles*
- M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et infectiologie*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la reproduction*
- Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et industrie des denrées alimentaires d'origine animale*
- M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
- M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et mathématiques*
- Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
- Mme **PRIYENKO Nathalie**, *Alimentation*

MAITRES DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **BRET Lydie**, *Physique et chimie biologiques et médicales*
- Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
- M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie, imagerie médicale*
- M. **COMBARROS Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
- Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie, bactériologie, pathologie infectieuse*
- Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
- M. **FERCHIOU Ahmed**, *Economie de santé des bovins*
- Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
- M. **FUSADE-BOYER Maxime**, *Microbiologie et infectiologie*
- M. **GAIDE Nicolas**, *Anatomie pathologique*
- Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*
- Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie, analgésie*
- M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des équidés*
- Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
- M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
- M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
- M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire, maladies animales réglementées*
- Mme **WARET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

INGENIEURS DE RECHERCHE

- M. **AUMANN Marcel**, *Urgences, soins intensifs*
- M. **AUVRAY Frédéric**, *Santé digestive, pathogénie et commensalisme des entérobactéries*
- M. **CASSARD Hervé**, *Pathologie des ruminants*
- M. **CROVILLE Guillaume**, *Virologie et génomique cliniques*
- Mme **DIDIER Caroline**, *Anesthésie, analgésie*
- M. **DELPONT Mattias**, *Clinique Aviaire*
- Mme **DUPOUY GUIRAUTE Véronique**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
- Mme **GAILLARD Elodie**, *Urgences, soins intensifs*
- Mme **GEFFRE Anne**, *Biologie médicale animale et comparée*
- Mme **GRISEZ Christelle**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **JEUNESSE Elisabeth**, *Bonnes pratiques de laboratoire*
- Mme **LAYSSOL-LAMOUR Catherine**, *Imagerie Médicale*
- Mme **POUJADE Agnès**, *Anatomie pathologique Vétérinaire*
- Mme **PRESSANTI Charline**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **RAMON PORTUGAL Felipe**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
- M. **REYNOLDS Brice**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **ROUCH BUCK Pétra**, *Médecine préventive*
- Mme **SAADA Chloé**, *Gestion intégrée de la santé des ruminants*

REMERCIEMENTS

À Monsieur Renaud MAILLARD,

Professeur à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse

Pathologie des ruminants

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury de thèse,

Hommages respectueux.

À Monsieur Pedro DIDIMO IMAZAKI,

Maître de conférence à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse

Hygiène et industrie des aliments

Pour avoir eu la gentillesse d'accepter de participer à ce jury de thèse,

Sincères remerciements.

À Monsieur Jean-Denis BAILLY,

Professeur à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse

Hygiène et industrie des aliments

Pour avoir accepté de diriger cette thèse,

Pour m'avoir accompagnée tout au long de ce travail,

Pour votre disponibilité, votre soutien, votre patience et vos précieux conseils,

Très sincères remerciements.

Un immense merci également à ma famille et mes amis pour leur soutien sans faille depuis le début de cette aventure.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	12
--------------------------	-----------

PARTIE 1

1. ENSILAGE DE MAÏS : CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES.....	14
---	-----------

1.1 CYCLE BIOLOGIQUE ET CULTURE DU MAÏS FOURRAGER.....	14
--	----

1.2 L'ENSILAGE DE MAÏS.....	17
-----------------------------	----

1.3 L'ENSILAGE : UN MODE DE CONSERVATION ASSOCIE A UNE BONNE VALEUR NUTRITIONNELLE.....	17
--	----

1.4 DE LA GRAINE AU FOURRAGE : ETAPES CLES DE LA FABRICATION DE L'ENSILAGE DE MAÏS	20
--	----

a. <i>Choix de la variété et de la date de semis</i>	21
--	----

b. <i>La récolte du maïs plante entière</i>	23
---	----

c. <i>Après la récolte, confection du silo</i>	26
--	----

d. <i>Distribution au troupeau</i>	28
--	----

1.5 ÉVOLUTION DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUE DE L'ENSILAGE AU COURS DU TEMPS	29
--	----

a. <i>Phase initiale : activité enzymatique</i>	29
---	----

b. <i>Phase fermentaire : activité bactérienne</i>	30
--	----

1.6 QUALITE DE L'ENSILAGE DE MAÏS ET CONSERVATION DANS LE TEMPS.....	32
--	----

a. <i>Évaluer la qualité d'un ensilage</i>	32
--	----

b. <i>Inoculants et conservateurs</i>	34
---	----

PARTIE 2

2. LES CONTAMINANTS POSSIBLES DE L'ENSILAGE DE MAÏS.....	38
---	-----------

2.1 LES CONTAMINANTS MICROBIOLOGIQUES	38
---	----

a. <i>Les contaminants bactériens</i>	38
---	----

b. <i>Moisissures</i>	50
-----------------------------	----

c. <i>Levures</i>	55
-------------------------	----

2.2 PLANTES TOXIQUES.....	56
---------------------------	----

a. <i>La morelle noire</i>	57
----------------------------------	----

b. <i>L'amarante</i>	58
----------------------------	----

c. <i>La Mercuriale</i>	59
-------------------------------	----

d. <i>Le Datura</i>	61
---------------------------	----

e.	<i>Le Chénopode blanc</i>	62
2.3	DANGERS CHIMIQUES.....	63
a.	<i>Présence de mycotoxines dans le maïs à la récolte</i>	64
b.	<i>Les amines biogènes</i>	70
c.	<i>L'azote sous toutes ses formes</i>	70
d.	<i>Les pesticides</i>	71
2.4	CONCLUSION PARTIELLE : LES CONTAMINANTS DE L'ENSILAGE DE MAÏS.....	72

PARTIE 3

3.	MAÎTRISE DES RISQUES SANITAIRES EN SUIVANT LA MÉTHODE HACCP.....	74
3.1	RAPPEL DES PRINCIPES DE LA METHODE HACCP.....	74
a.	<i>Analyse des dangers</i>	75
b.	<i>Identification des points critiques de maîtrise (CCP)</i>	76
c.	<i>Limites critiques à ne pas dépasser</i>	77
3.2	ADAPTATION DE LA METHODE HACCP A L'ENSILAGE DE MAÏS	78
a.	<i>Analyse des dangers</i>	78
b.	<i>Étapes clés de maîtrise (CCP) et actions correctives</i>	81

PARTIE 4

4.	IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA CULTURE DU MAÏS ET SON ENSILAGE.....	84
4.1	IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA CULTURE DU MAÏS	84
	<i>Impact sur la récolte et le hachage du maïs</i>	85
4.2	IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA NATURE DES DANGERS LIES A LA FABRICATION DE L'ENSILAGE DE MAÏS	85
a.	<i>Impact sur le développement de microorganismes dans les silos</i>	85
b.	<i>Impact sur les adventices pouvant se développer au champ</i>	86
c.	<i>Impact sur les moisissures et les mycotoxines</i>	87
4.3	ADAPTATIONS POSSIBLES DES AGRICULTEURS POUR FAIRE FACE A CES CHANGEMENTS	88

	CONCLUSION.....	90
	BIBLIOGRAPHIE	92

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Schéma d'un plant de maïs et de son grain (Intercéréales 2022)	14
Figure 2 - Phases de développement du maïs (Arvalis 2012)	15
Figure 3 – Les différentes étapes de fabrication de l'ensilage de maïs et les points à contrôler	21
Figure 4 - Influence de la date de semis sur la teneur en amidon de l'ensilage de maïs cultivé au Wisconsin (Lauer 2007)	22
Figure 5 - Impact de la date de semis sur la valeur alimentaire du fourrage (Arvalis 2014)	22
Figure 6 - Estimation du taux de matière sèche du maïs (Arvalis 2012)	24
Figure 7 - Méthode d'ensilage de maïs fourrage (Schoy 2021)	24
Figure 8 - Composition de l'ensilage selon le taux de MS du maïs lors de sa récolte (Carpentier 2014)	25
<i>Figure 9 - Exemple de silo taupinière (Willmann 2006)</i>	<i>27</i>
Figure 10 - Exemple de silo couloir (Vimond 2016)	27
Figure 11 – Développement d'une espèce fongique tolérante au confinement dans un silo d'ensilage de maïs (Bailly, Bailly 2017)	51
Figure 12 - Morelle noire - Solanum nigrum L. (Boisse 2019; Stueber 2007a)	57
Figure 13 - Amarante réfléchie - Amaranthus retroflexus L. (Wiete 2019; Pinto, Orsini 2010)	58
Figure 14 - Mercuriale annuelle - Mercurialis annua L. (Dante 2017; Milcent 2011)	60
Figure 15 - Datura stramoine - Datura stramonium L. (Bornand 2018; Köhler 1887)	61
Figure 16 - Chénopode blanc - Chenopodium album L. (Bolomier 1999; Stueber 2007b)	62
Figure 17 – Métabolisation de l'aflatoxine B1 en aflatoxine M1 (Vaz et al. 2020)	68
Figure 18 - Diagramme d'Ishikawa représentant la « méthode des 5M »	76
Figure 19 - Arbre décisionnel des points critiques pour la maîtrise (FAO 2023)	77
Figure 20 - Schéma simplifié des différentes étapes de fabrication d'un ensilage de maïs	78
Figure 21 - Dénombrement d' <i>Aspergillus flavus</i> par année de récolte (en UFC par gramme de grains) (Arvalis 2020)	87
Figure 22 - Rendement du maïs attendu en 2050 à l'échelle européenne sous hypothèse modérée d'émission de CO2 (Tardieu, Welcker, Parent 2019)	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Définition des groupes de précocité en maïs grain, besoin en températures pour atteindre floraison et maturité physiologique, correspondance estimée avec les indices FAO (Arvalis 2024)....	16
Tableau 2 - Composition chimique des différentes formes de maïs (INRA 2018).....	19
Tableau 3 - Exemple de ration à 100g PDIE/UFL pour un troupeau de VL de 650 kg de poids vif et un stade de lactation de 180 jours (Jurquet 2016).....	20
Tableau 4 - Évolution enzymatique et microbiologique d'un fourrage ensilé (Paragon et al. 2004).....	32
Tableau 5 - Barème INRA d'appréciation de la qualité de conservation d'un ensilage de maïs (Paragon et al. 2004).....	33
Tableau 6 - Impact de la dose appliquée de <i>Lactobacillus buchneri</i> sur différents paramètres de fermentation et de conservation de l'ensilage de maïs (Kleinschmit, Kung 2006).....	36
Tableau 7 - Les additifs d'ensilage du maïs fourrage, description, principaux mécanismes et objectifs recherchés (Arvalis 2018)	37
Tableau 8 - Principales caractéristiques des bactéries pouvant contaminer l'ensilage de maïs.....	49
Tableau 9 - Moisissures productrices de toxines trémorgènes (Galtier et al. 2006).....	52
Tableau 10 - Principales moisissures pouvant contaminer l'ensilage de maïs et leurs mycotoxines	54
Tableau 11 – Fréquence des différentes mycotoxines présentes dans l'ensilage de maïs ainsi que la concentration moyenne retrouvée, basé sur 1117 échantillons (Weaver et al. 2021).....	54
Tableau 12 - Caractéristiques de croissance et de toxinogénèse d' <i>Aspergillus flavus</i> (ANSES 2012) .	66
Tableau 13 - Principales caractéristiques des moisissures pouvant contaminer l'ensilage de maïs au champ	69
Tableau 14 – Fréquence des différentes mycotoxines présentes dans l'ensilage de maïs ainsi que la concentration moyenne retrouvée basé sur 1117 échantillons (Weaver et al. 2021; Règlement Européen 2023; 2016; 2003).....	69
Tableau 15 - Démarche HACCP appliquée à l'ensilage de maïs	78
Tableau 16 – Points critiques pour la maîtrise isolés lors de la confection de l'ensilage de maïs	81

LISTE DES ABREVIATIONS

- AFB1** – Aflatoxine B1
- AIEC** – *Escherichia coli* adhérents invasifs
- CB** – Cellulose brute
- CCP** – Critical Control Point (point critique de maîtrise)
- DAEC** – *Escherichia coli* adhérents diffus
- DON** – Déoxynivalénol
- EAEC** – *Escherichia coli* entéroagrégatifs
- EIEC** – *Escherichia coli* entéroinvasifs
- EPEC** – *Escherichia coli* entéropathogènes
- ETEC** – *Escherichia coli* entérotoxinogènes
- FAO** – Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
- UTC** – Unité thermique de croissance
- SAU** – Surface agricole utile
- GDS** – Groupement de défense sanitaire
- GIEC** – Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- HACCP** – Hazard Analysis Critical Control Point (système d'analyse des risques et de maîtrise des points critiques)
- INRAE** – Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
- MAT** – Matière azotée totale
- MS** – Matière sèche
- PDI** – Protéines digestibles dans l'intestin
- PDIE** – Protéines digestibles dans l'intestin permises par l'énergie
- STEC** – *Escherichia coli* producteurs de Shiga-toxines
- TIAC** – Toxi-infections alimentaires collectives
- ANSES** – Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
- UFL** – Unité fourragère lait
- UFV** – Unité fourragère viande

INTRODUCTION

L'ensilage de maïs est un élément clé de l'alimentation animale, particulièrement dans les élevages de ruminants, grâce à sa haute teneur en énergie et sa durée de conservation. La qualité sanitaire de l'ensilage de maïs est donc un enjeu crucial pour les exploitations bovines laitières, où l'alimentation constitue un levier essentiel pour optimiser la production et la santé des animaux. Toutefois, la qualité sanitaire de l'ensilage peut être compromise par divers facteurs, notamment la contamination par des bactéries pathogènes, des moisissures et des mycotoxines, mais également par l'incorporation possible de végétaux toxiques et la production de dérivés chimiques. Ces derniers peuvent altérer la santé des troupeaux et, parfois, la santé humaine via le transfert de ces contaminants dans la chaîne alimentaire suite à leur excrétion dans le lait.

La qualité sanitaire de l'ensilage est donc un élément clé dans le maintien des performances zootechniques des animaux, mais aussi dans la préservation de la qualité du lait produit, lequel doit répondre à des normes strictes pour pouvoir être dirigé vers l'alimentation humaine, et en particulier infantile.

Ce travail de thèse se propose d'explorer les différentes étapes de fabrication de l'ensilage de maïs, d'évaluer les problèmes sanitaires qui peuvent survenir et examiner leurs répercussions possibles sur la production bovine laitière et d'envisager quelles mesures préventives peuvent être mises en place pour limiter le risque d'apparition de ces problèmes. Nous aborderons dans un premier temps la méthode de fabrication de l'ensilage et les processus de fermentation et de conservation. Dans un second temps, nous mettrons en lumière les facteurs de risques et les agents contaminants les plus courants pouvant impacter la qualité du fourrage et ceux pouvant influencer la santé des vaches laitières, voire de l'Homme. Dans un troisième temps, nous présenterons les stratégies de gestion et de prévention qui peuvent être mises en place pour garantir la sécurité sanitaire de l'ensilage de maïs. Pour cela, nous utiliserons une approche s'inspirant de la démarche HACCP, classiquement utilisée dans les entreprises agro-alimentaires pour garantir la sécurité des produits mis sur le marché. Pour terminer, nous évoquerons l'impact possible des changements climatiques en cours sur la production de maïs en France ainsi que les adaptations possibles afin de minimiser leur impact sur la préparation et la qualité sanitaire de l'ensilage.

– PARTIE 1 –

1. ENSILAGE DE MAÏS : CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

1.1 Cycle biologique et culture du maïs fourrager

Le maïs, *Zea mays L.* est une plante herbacée annuelle qui peut mesurer jusqu'à quatre mètres de hauteur, elle appartient à la famille des Poacées. Comme le montre la figure 1, la fleur mâle se développe au niveau du bourgeon terminal formant la panicule et la fleur femelle se développe au niveau des bourgeons secondaires, formant les épis qui portent les grains de maïs (Intercéréales 2022).

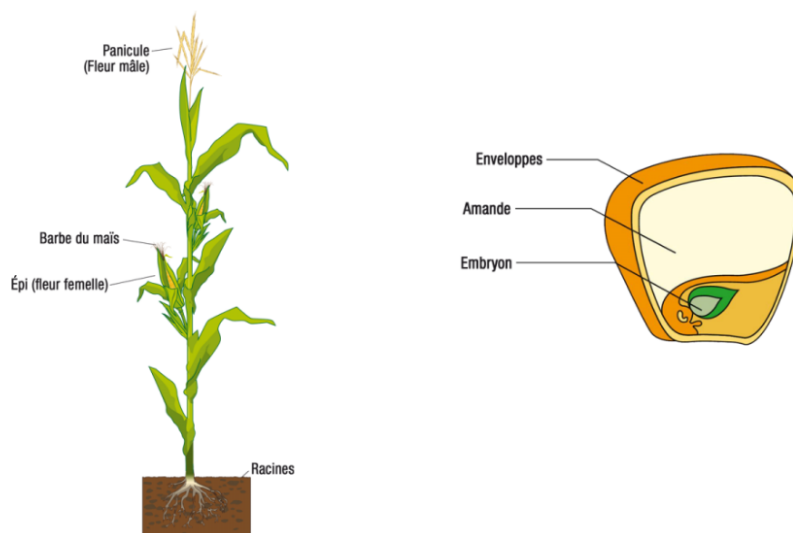


Figure 1 - Schéma d'un plant de maïs et de son grain (Intercéréales 2022)

En France, le maïs est semé au printemps, généralement entre avril et mai en fonction des régions et du climat. Les différentes phases de développement du maïs sont présentées sur la figure 2. Les plants lèvent 1 à 3 semaines après le semis, puis, environ 2 mois plus tard, on a le stade 6-8 feuilles qui marque la fin de la phase végétative et le début de la phase de reproduction. La panicule fleurit pendant l'été, suivi de la fécondation formant les épis contenant les grains de maïs. La récolte est généralement réalisée à l'automne.

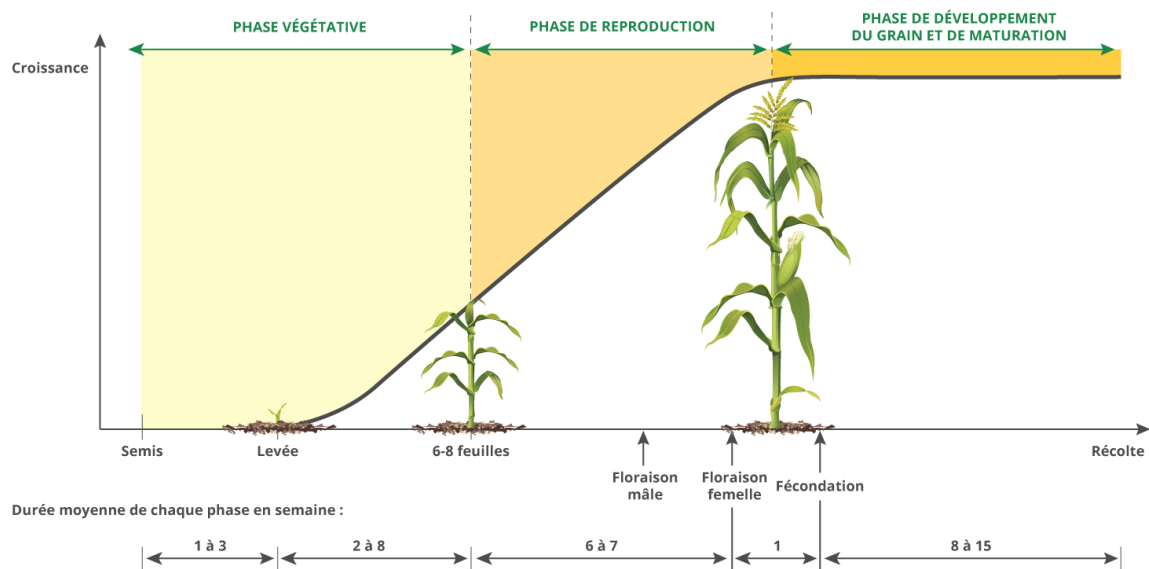


Figure 2 - Phases de développement du maïs (Arvalis 2012)

Le maïs est une plante utilisée de multiples manières : maïs grain, fourrage, doux ou semence. Les principaux débouchés de la culture du maïs sont le maïs grain et le maïs fourrage (Intercéréales 2022). Pour le maïs grain, seuls les épis sont récoltés. Ils sont riches en amidon et en huile ce qui en fait un aliment nutritionnellement intéressant dans la ration des animaux d'élevage. Pour le maïs fourrage, c'est l'entièreté de la plante qui est récoltée et qui sera utilisée pour l'alimentation animale. Concernant le maïs doux, il est principalement destiné à l'alimentation humaine : bouilli, cuit à la vapeur, ou sous forme de maïs éclaté. Enfin, pour le maïs semence, il vise la fabrication de semences de maïs afin de produire les autres types de maïs présentés précédemment. Pour cela, on plante de façon différenciée des plants femelles et mâles, on récolte les épis, on les sèche, on les égraine puis on les enrobe avec un traitement leur permettant une croissance précoce, un pouvoir répulsif envers les ravageurs et une résistance à certaines maladies.

Depuis les années trente, les progrès génétiques ont contribué à l'amélioration des caractéristiques agronomiques de cette céréale (Fournier 2016). La création d'hybrides a permis de rendre le maïs plus résistant aux conditions environnementales et aux maladies auxquelles il peut être exposé. Parmi ces avancées, on retrouve la notion de précocité : certaines variétés sont plus ou moins tardives ce qui correspond à une période de croissance différente. Il existe une échelle internationale pour qualifier cette précocité : l'indice FAO. Plus il est élevé, plus la variété a besoin de temps pour arriver à maturité. Une variation de cet indice de 100 correspond à environ dix jours de culture supplémentaire.

Pour expliquer ce phénomène, deux notions sont importantes : le zéro de végétation et l'Unité Thermique de Croissance (UTC). Premièrement, les plantes annuelles ont besoin d'une température minimale afin de se développer : c'est le zéro de végétation. Cette température dépend de la plante cultivée. Pour le maïs, on est sur une base de 6°C. En dessous de cette température, le maïs reste dans un état végétatif et ne croît pas. Deuxièmement, l'UTC correspond, elle, à l'accumulation des températures auxquelles sont soumis les plants de maïs pendant toute la durée de leur culture. C'est là qu'intervient la notion de précocité. En effet, moins une variété de maïs nécessitera de chaleur pour croître, plus elle sera précoce. Inversement, plus il lui faudra une accumulation de chaleur importante pendant sa durée de croissance, plus elle sera tardive. Les besoins de la plante se calculent en réalisant la somme des degrés jours selon la formule suivante (Ducourthial, Hanryon 2018) :

$$\text{Degré-Jour quotidien} = ((T_{\min} + T_{\max})/2) - T_{\text{base}}$$

T_{\min} = température minimale du jour (°C) entre 18h la veille et 18h le jour-même

T_{\max} = température maximale du jour (°C) entre 6h le jour-même et 6h le lendemain

T_{base} = température de zéro de végétation de la plante (6°C pour le maïs)

Ce calcul permet d'estimer la durée de croissance d'une plante et donc la date de récolte. On retrouve la somme des degrés jours nécessaires à la croissance des variétés selon leur précocité sur le tableau 1. En fonction du type de culture, on choisira des variétés différentes : le maïs grain est souvent produit avec des variétés tardives alors que, pour l'ensilage de maïs, on utilise souvent des variétés plus précoces. En fonction des régions et des aléas climatiques, la date de récolte estimée initialement peut évoluer au cours de la saison.

Tableau 1 - Définition des groupes de précocité en maïs grain, besoin en températures pour atteindre floraison et maturité physiologique, correspondance estimée avec les indices FAO (Arvalis 2024)

Précocité	Groupe	Besoins en température base 6°C		Indice FAO (estimation)
		Semis à flor. Femelle	Du semis à 32 % d'hum	
Très précoces	G0	790 à 850	1600 à 1700	150-250
Précoces	G1	855 à 885	1680 à 1760	240-290
1/2 précoces cornées dentées	G2	865 à 930	1740 à 1820	280-330
1/2 précoces dentées	G3	930 à 985	1800 à 1880	310-400
1/2 Tardives	G4	975 à 1020	1870 à 1950	400-480
Tardives	G5	1010 à 1060	1940 à 2020	470-570

Le maïs est la première céréale cultivée dans le monde, représentant 40% de la production céréalière mondiale (Intercéréales 2022). En Europe, c'est la France qui est la

première productrice avec 11% de la surface agricole utile (SAU) dédiée à cette culture (Intercéréales 2022). Au sein de cette SAU, 85 à 87% des surfaces en maïs sont destinées à l'alimentation animale (Bayer 2022). Même si cette production diminue, elle reste la deuxième céréale française cultivée après le blé tendre (Agreste 2023a). Concernant le maïs fourrage, 1,2 millions d'hectares sont cultivés en France. Cela a permis de produire 15,3 millions de tonnes d'ensilage de maïs en 2023 (Agreste 2023b). Dans la suite de ce travail, nous allons nous concentrer sur l'ensilage de maïs.

1.2 L'ensilage de maïs

L'ensilage est une technique de conservation des fourrages qui s'est développée en France dans les années 70. Ce développement du maïs fourrage fait suite à la mécanisation et l'invention de nouvelles variétés précoces de maïs, rendant possible la culture de cette céréale dans des zones plus froides, notamment le nord-ouest du pays (Beauvais, Cantat, Madeline 2021). L'intérêt d'utiliser une telle méthode de conservation est de disposer d'une base fourragère tout au long de l'année, indépendamment des aléas climatiques de l'année, le tout avec un fourrage peu coûteux.

Du fait de sa facilité à être ensilé, le maïs est la première plante utilisée en France : plus de 80% des vaches laitières françaises consomment du maïs ensilage pendant au moins une partie de l'année (Paragon et al. 2004). Cette importante consommation de l'ensilage de maïs est liée à la possibilité de le conserver sur le long terme et à sa valeur alimentaire intéressante.

1.3 L'ensilage : un mode de conservation associé à une bonne valeur nutritionnelle

L'ensilage de maïs qui nous intéresse est réalisé avec du maïs plante entière. Il s'agit d'une technique de conservation par fermentation et acidification ; les mécanismes chimiques précis de l'évolution des caractéristiques au sein du silo seront détaillés par la suite. De fait, le fourrage est stabilisé grâce à l'obtention d'un pH acide et d'une anaérobiose (Encadré 1). Ceci permet de minimiser les pertes en matière sèche et de conserver une bonne valeur alimentaire du fourrage sur une période prolongée (apport énergétique et azoté), tout en limitant le risque de développement de micro-organismes indésirables qui pourraient altérer l'aliment et avoir des conséquences néfastes sur la santé animale et, secondairement, sur la santé humaine.

Encadré 1 : Phénomène d'anaérobiose au sein d'un silo d'ensilage de maïs

Le terme « anaérobiose » est couramment utilisé pour définir les conditions de conservation d'un ensilage. Or, en réalité cette anaérobiose n'est pas absolue. La fabrication, le hachage, le tassement etc. font que l'anaérobiose « vraie » n'est pas possible. Il y a nécessairement de très faibles teneurs en oxygène au sein des silos : celui présent dans les plantes au moment de la récolte, celui présent dans de petites cavités liées à la forme des particules... Par conséquent, l'ensilage correspond plus à une situation de micro-aérophilie. Cependant, dans la suite de ce travail, pour une facilité d'expression, nous parlerons tout de même « d'anaérobiose », tout en gardant à l'esprit la présence résiduelle de faibles quantités d'oxygène.

Pour analyser les apports d'un composant d'une ration alimentaire, un certain nombre de critères sont importants :

- **La matière sèche (MS)** correspond à ce que l'on obtient lorsqu'on retire l'eau d'un produit. Un ensilage à 35% de MS contient 65% d'eau.
- **La cellulose brute (CB)** correspond à la teneur en parois végétales. Plus cette teneur est élevée, moins la digestibilité du fourrage sera bonne. Cependant, elle permet la bonne rumination des animaux.
- **Les matières azotées totales (MAT)** correspondent à la teneur en azote (protéines et acides aminés) du fourrage.
- **L'amidon** est quant à lui une source importante d'énergie, il est contenu dans les grains du maïs. Le taux d'amidon permet d'évaluer la qualité du maïs, mais aussi le risque d'acidose associé. Il est rapidement fermenté dans le rumen et donc acidifie fortement ce dernier, ce qui peut bouleverser la flore bactérienne interne s'il est présent en trop grande quantité.
- **Les unités fourragères lait / viande (UFL / UFV)** représentent la valeur énergétique du fourrage.
- **Les protéines digestibles dans l'intestin grêle (PDI)** reflètent la valeur protéique de l'aliment.
- **Les protéines digestibles dans l'intestin grêle permises par l'énergie (PDIE)** apportée par l'aliment.

Les valeurs alimentaires des différentes formes de maïs sont présentées dans le tableau 2. On constate que l'ensilage de maïs plante entière est la forme de maïs qui contient le plus de cellulose brute. C'est pour cette raison qu'il permet une bonne rumination et réduit les risques d'acidose ruminale, tout en conservant une bonne teneur en amidon (apport énergétique) et un bon taux protéique. Ces deux éléments sont essentiels pour une production laitière optimale.

Tableau 2 - Composition chimique des différentes formes de maïs (INRA 2018)

	Ensilage de maïs plante entière	Maïs épi	Maïs grain humide	Maïs grain sec
<i>Teneur en MS (%)</i>	34,7	53	67	86,3
<i>Cellulose brute (g/kg MS)</i>	200	90	26	26
<i>MAT (g/kg MS)</i>	76	83	92	89
<i>Amidon (g/kg MS)</i>	322	630	737	739
<i>UFL (/kg MS)</i>	0,96	1,08	1,23	1,24
<i>UFV (/kg MS)</i>	0,92	1,05	1,26	1,26
<i>PDI (/kg MS)</i>	62	78	78	94

MS : Matière Sèche, MAT : Matière Azotée Totale ; UFL : Unité Fourragère Lait ; UFV : Unité Fourragère Viande ; PDI : Protéines Digestibles Intestin

La conservation sous forme d'ensilage présente plusieurs avantages. Elle permet de conserver les nutriments comme les glucides (amidon), les protéines et les vitamines présents dans la plante. En créant un environnement anaérobie, on limite la croissance de nombreux micro-organismes pathogènes et d'altération et, de ce fait, la conservation est améliorée (Agriconomie 2023). L'ensilage permet également une flexibilité saisonnière : une grande quantité de fourrage est récoltée sur une période courte de l'année. C'est intéressant, en période hivernale, de disposer de fourrages lorsque la croissance de l'herbe est limitée. Enfin, cet aliment a une densité énergétique élevée. L'ensilage de maïs plante entière contient à la fois des parties végétales riches en fibres et des grains riches en amidon. Les fibres « digestibles » permettent l'apport énergétique, tandis que les fibres « indigestibles » permettent de réguler l'ingestion.

Grâce à ses intérêts nutritionnels, il est utilisé dans près de 70% des rations hivernales des vaches laitières (Férard 2017). Néanmoins, il intervient comme constituant d'une ration et ne peut pas être distribué seul puisqu'il serait alors globalement déficitaire en protéines, minéraux et vitamines (Férard 2017). Il sera donc nécessaire de compléter la ration avec un correcteur azoté, un minéral et des vitamines, au minimum. Un exemple de ration pour vache laitière sur une base de production de 30 kg de lait par jour par vache est présenté dans le tableau 3. La ration est équilibrée à 100 g de PDIE/UFL puisque c'est à ce niveau que les vaches

valorisent le mieux la protéine de la ration. En dessous, la production laitière est impactée et au-dessus, le coût du concentré rapporté à l'augmentation de production laitière est moins intéressant.

Tableau 3 - Exemple de ration à 100g PDIE/UFL pour un troupeau de VL de 650 kg de poids vif et un stade de lactation de 180 jours (Jurquet 2016)

	Ration pour une production laitière : 30 kg/VL/j	Rôle
Ensilage de maïs (kg MS/VL/j)	17,5	Source d'énergie et de fibres
Foin de graminée (kg MS/VL/j)	1	Favorise rumination et digestion
Tourteau de soja 48 (kg brut/VL/j)	3	Source de protéines
Aliment contenant 80% d'urée (g/VL/j)	75	Améliore la digestibilité des glucides
AMV 5-24-4 (g brut/VL/j) (5% P- 24% Ca- 4% Mg)	260	Corrige les déséquilibres et couvre les besoins en oligo-éléments et vitamines
Carbonate de calcium (g brut/VL/j)	60	Stimule la lactation et fournit le calcium nécessaire au métabolisme laitier
Ingestion totale (kg MS/VL/j)	21,5	

L'ensilage de maïs occupe donc une place majoritaire dans la ration des bovins laitiers français. Nous allons maintenant détailler son mode de fabrication.

1.4 De la graine au fourrage : étapes clés de la fabrication de l'ensilage de maïs

Les grandes étapes de la fabrication d'un ensilage de maïs plante entière et les points clés pour chaque étape sont récapitulés sur la figure 3.

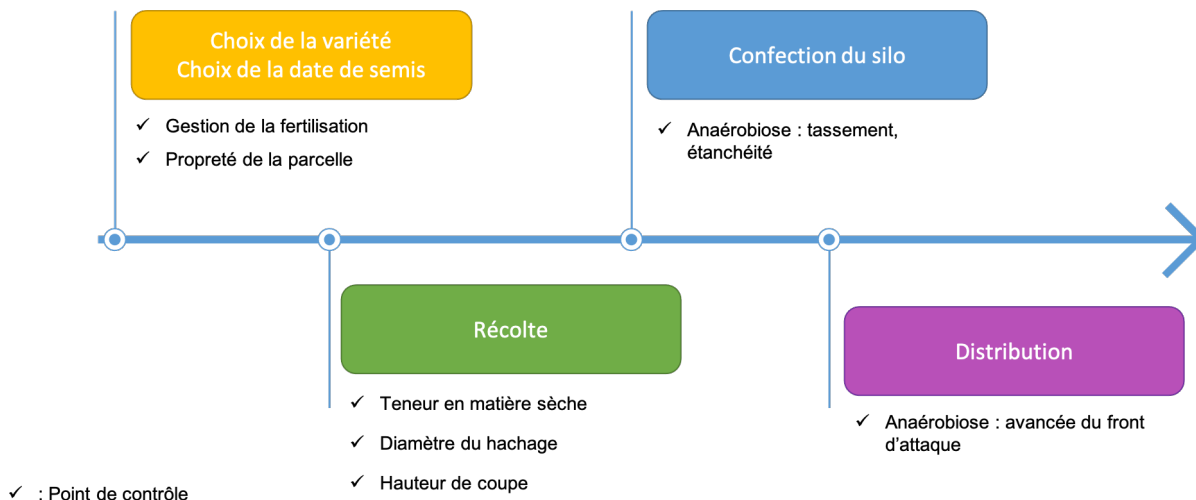


Figure 3 – Les différentes étapes de fabrication de l'ensilage de maïs et les points à contrôler

a. Choix de la variété et de la date de semis

Généralement, le maïs est semé en France entre mi-avril et mi-mai, en fonction de la région et des conditions climatiques. Cependant, comme vu précédemment, l'UTC joue un rôle important dans le développement de la plante. Il est donc essentiel de s'adapter au climat de sa région pour choisir la date de semis et la variété optimale pour réaliser son ensilage. Les changements climatiques en cours peuvent rendre ces choix plus difficiles.

Pour le maïs fourrage, le fait de choisir une variété précoce permet de mieux gérer la date de récolte. Cela permet également l'implantation ultérieure d'une culture d'hiver et sa valorisation par le bétail.

La date de semis va jouer un rôle important sur la valeur alimentaire du fourrage final. En effet, comme le montre la figure 4, lorsque le semis est précoce, la concentration en amidon de la plante cultivée est élevée et donc l'énergie de la ration future également. Par contre, la plantule est plus sensible aux maladies et aux possibles épisodes de gels printaniers. De plus, la levée a du mal à se faire s'il y a eu de fortes pluies au printemps, du fait de l'épaississement du sol en surface (Fournier 2016).

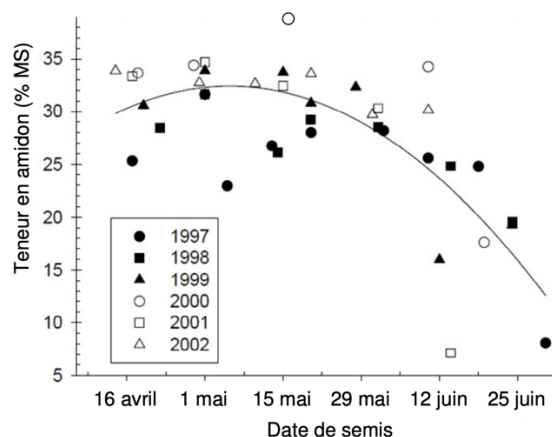


Figure 4 - Influence de la date de semis sur la teneur en amidon de l'ensilage de maïs cultivé au Wisconsin (Lauer 2007)

Inversement, en cas de semis trop tardif, on observe une diminution du rendement, de la teneur en amidon, de la MAT (Matière Azotée Totale), de la digestibilité des fibres et de l'UFL (Unité Fourragère Lait) par rapport aux valeurs obtenues avec une date optimale de semis (Figure 5). Ainsi, même si la valeur alimentaire n'est pas optimale, il semble quand même préférable de réaliser un semis précoce plutôt qu'un semis tardif pour la réalisation d'un bon ensilage maïs plante entière.

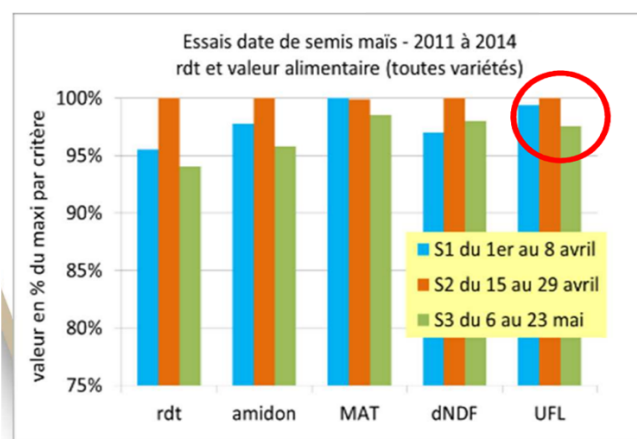


Figure 5 - Impact de la date de semis sur la valeur alimentaire du fourrage (Arvalis 2014)
Rdt : rendement ; MAT : Matière Azotée Totale ; dNDF : digestibilité des fibres ; UFL : Unité Fourragère Lait

Pour ce qui est de la densité, on recommande 70 000 à 81 000 plants par hectare pour l'ensilage de maïs. Si le semis est précoce, il convient d'augmenter de 10% les semences, contre une augmentation de 5% si les conditions pédologiques sont optimales, afin de compenser le taux de germination qui n'est jamais de 100% (Fournier 2016).

✓ **Point de contrôle : la maîtrise de la qualité de la parcelle**

Pour cultiver du maïs destiné à la fabrication d'ensilage, un certain nombre de points devront être maîtrisés au niveau de la parcelle. Pour chaque culture, le choix du terrain est important et doit suivre quelques règles.

Premièrement, pour la production de maïs destiné à l'ensilage, le champ doit être « propre ». Cela signifie qu'il ne doit pas y avoir de résidus de fumiers : les derniers épandages doivent dater d'au moins deux mois avant le semis. Par ailleurs, il faut éviter les émergences de terre type taupinières sur la parcelle : cela peut être vecteur de germes telluriques au moment de la récolte (voir partie 2).

Deuxièmement, il faut être vigilant lors d'apport de fumure azotée. Si on ajoute de l'azote sur la parcelle, on diminue l'azote soluble ainsi que le taux de matière sèche des plants de maïs et, inversement, on augmente son pouvoir tampon. L'augmentation de ce dernier ralentira l'acidification et donc limitera la conservation (Paragon et al. 2004).

La conduite de la parcelle de maïs a donc un effet direct sur la production d'ensilage et sa conservation.

b. La récolte du maïs plante entière

Le maïs plante entière se récolte lorsque le grain est au stade pâteux-vitreux ce qui correspond à un taux de matière sèche d'environ 33-34%. Il est important d'estimer correctement le taux de matière sèche lors de la récolte puisqu'il aura un rôle important dans la conservation de l'ensilage de maïs par la suite. Il est possible d'estimer visuellement la valeur en matière sèche des grains comme le montre la figure 6 et donc de réaliser ainsi un contrôle au champ, avant récolte.

	Début de l'observation		Stades repérés		Périodes de récolte	
GRAINS CORNÉS DENTÉS						
	Début remplissage floraison + 250 à 300 dj	1 ^{re} lentilles vitreuses au sommet des grains des couronnes centrales	Lentille vitreuse visible au sommet de la majorité des grains	Amidon vitreux à l'extrémité de tous les grains, l'amidon vitreux représente 15 % du volume du grain.	Floraison + 600 à 650 dj, les 3 amidons sont répartis en trois tiers dans le grain	Grain 50 % vitreux, laiteux à la pointe
	< 22 % MS	23-24 % MS	25-26 % MS	27-29 % MS	31-32 % MS	33-34 % MS
		Prévision possible de la date de récolte	Prévision possible de la date de récolte	Si nécessaire, début de récolte possible à 29% MS (non recommandé)	Début de la période optimale de récolte	Période optimale de récolte
						Au delà de la période optimale de récolte, grains à éclater
ALIMENTATION HYDRIQUE RÉGULIÈRE, GRAND GABARIT, FEUILLES VERTES	< 23 % MS	26-27 % MS	28-29 % MS	31-32 % MS	33-34 % MS	36-37 % MS
		Prévision possible de la date de récolte	Début de récolte possible à 29 % MS, si nécessaire	Début de la période optimale de récolte	Période optimale de récolte	Au-delà de la période optimale de récolte, attention au dessèchement des tiges et feuilles
ALIMENTATION HYDRIQUE LIMITÉE, GABARIT MOYEN, FEUILLES +/- SÈCHES						> 39 % MS
						Récolte trop tardive

Figure 6 - Estimation du taux de matière sèche du maïs (Arvalis 2012)

La récolte est réalisée grâce à des ensileuses, également appelées récolteuses-hacheuses-chargeuses automotrices comme présenté sur la figure 7. Elles sont utilisées pour la récolte des fourrages en coupe fine, la finesse de hachage et la hauteur de coupe étant réglables. Le produit haché est expulsé par soufflerie vers une trémie de transport.



Figure 7 - Méthode d'ensilage de maïs fourrage (Schoy 2021)

Pour une récolte idéale, il faut maîtriser un certain nombre de points que nous allons aborder.

✓ **Point de contrôle : teneur en matière sèche**

Comme présenté sur la figure 8, il ne faut pas utiliser un maïs avec un taux de matière sèche trop élevé. Par exemple, une différence de 10% de matière sèche va jouer sur la composition finale de l'ensilage et, *in fine*, sur sa conservation. En effet, plus le taux de matière sèche est important, plus l'air est présent dans l'ensilage, et plus des pathogènes ou des agents d'altération seront susceptibles de se développer (Figure 8).

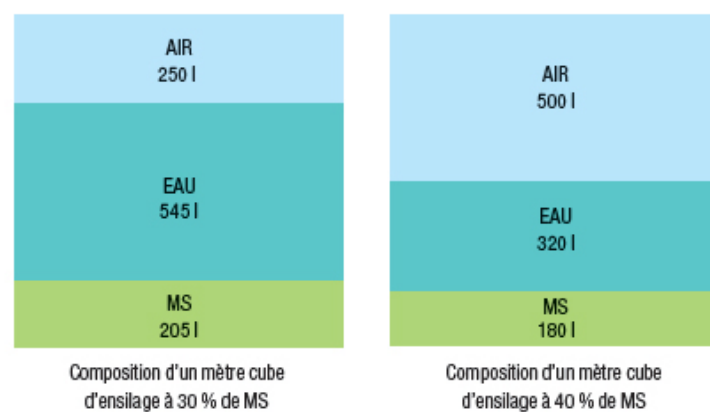


Figure 8 - Composition de l'ensilage selon le taux de MS du maïs lors de sa récolte (Carpentier 2014)

En effet, un ensilage réalisé avec un maïs trop sec, à plus de 40% de matière sèche, est plus difficile à hacher et à tasser de manière uniforme. La teneur en oxygène résiduel sera plus élevée. La fermentation, elle, sera plus difficile à conduire, ce qui engendrera des problèmes de conservation.

Inversement, si on récolte à un taux de matière sèche inférieur à 30%, l'humidité excessive va entraîner une fermentation anormalement forte et une acidification trop importante pour la consommation animale (Fournier 2016).

✓ **Point de contrôle : hauteur de coupe**

La hauteur de coupe standard est de 15 cm. Néanmoins, si on veut augmenter la teneur énergétique du fourrage, on peut relever la barre de coupe, on aura alors un ratio tige/grain inférieur et donc une plus grande valeur énergétique du fourrage.

La hauteur de coupe est aussi un élément à maîtriser pour ne pas contaminer l'ensilage. En effet, il ne faut pas récolter le maïs au ras du sol au risque d'incorporer de la terre et donc de contaminer le silo avec des germes telluriques sur lesquels nous reviendrons dans la partie suivante (Paragon et al. 2004).

✓ **Point de contrôle : gestion du hachage**

Le hachage du maïs plante entière est spécifique. Il faut que le hachage soit fin : de 6 à 8 millimètres et que moins de 1% des brins aient une taille supérieure à 2 centimètres. En effet, si les brins sont trop longs, cela jouera à la fois sur la consommation future du fourrage, mais également sur la possibilité de tasser correctement ce dernier dans le silo, impactant sa conservation.

La coupe de l'ensilage de maïs doit être franche pour obtenir des particules non laminées et permettre une bonne digestion par les animaux : l'affûtage des couteaux est essentiel.

On peut mesurer la granulométrie de l'ensilage de maïs à l'aide d'un tamis pour régler correctement l'ensileuse.

c. Après la récolte, confection du silo

C'est l'étape essentielle dans la fabrication de l'ensilage de maïs. C'est elle qui conditionne la qualité sanitaire du fourrage final. De ce fait, plusieurs éléments sont très importants : choix du silo, tassement, étanchéité etc.

Il existe différents types de silos, mais tous ont le même but : permettre l'obtention d'une bonne anaérobiose pour que le processus fermentaire soit optimal.

Les silos horizontaux sont les plus utilisés car facilement réalisables. Il en existe deux types : les silos taupinières et les silos couloirs. Ces derniers se caractérisent par la présence de parois latérales comme le montrent les figures 9 et 10.



Figure 10 - Exemple de silo couloir (Vimond 2016)



Figure 9 - Exemple de silo taupinière (Willmann 2006)

La présence de parois fait que le volume du silo est fixe et ne peut pas être modifié. Néanmoins, cela permet une certaine sécurité lors du tassement (moins de risque de retournement du tracteur) et permet de limiter les pertes lors du désilage (pas d'écoulements sur les côtés du silo). L'inconvénient du silo couloir réside dans la difficulté d'obtenir un bon tassement, compliqué par la présence des parois latérales. Pour les silos taupinières, l'absence de paroi limite la hauteur du silo. On constate aussi un plus grand gaspillage de l'ensilage lors de sa distribution car des projections peuvent avoir lieu sur les côtés du silo. Il convient de noter que si ces déchets ne sont pas retirés, ils peuvent être le siège de développement de germes pathogènes ou d'altération et ainsi contaminer le reste de l'ensilage. On a également besoin d'une quantité plus grande de bâches pour couvrir les silos taupinières, ce qui augmente les risques de perforation et de perte de l'anaérobiose.

Quel que soit leur type, les silos ne doivent pas être en contact direct avec le sol pour éviter les contaminations par des germes opportunistes du sol. Ils doivent être confectionnés avec une légère pente afin d'évacuer les jus d'ensilage produits et que l'eau de pluie ou les effluents ne ruissellent pas sur le front de coupe. Généralement, ils ont une hauteur comprise entre 1,50 et 3 mètres après tassement (Moquet 2022).

La bonne réalisation du silo nécessite, elle aussi, la maîtrise d'un certain nombre de points clés.

✓ **Point de contrôle : gestion du tassement**

Le but du tassement est de chasser l'air et d'obtenir des conditions d'anaérobiose de façon mécanique. Pour réaliser un remplissage correct, il est conseillé de décharger les remorques dans une aire propre puis de procéder au tassement petit à petit. Un tracteur prend le fourrage et le dispose en fines couches successives de 10-20 cm maximum qui sont tassées au fur et à mesure à une vitesse de 3-4 km/h. Il faut alors être vigilant à ne pas incorporer de terre via les roues du tracteur (Moquet 2022).

✓ **Point de contrôle : gestion de l'étanchéité**

L'ensilage est ensuite bâché avec un film plastique non endommagé, qui est maintenu dans l'idéal avec des sacs de sable, permettant la meilleure étanchéité possible. Les pneus sont régulièrement utilisés pour maintenir la bâche, mais leur utilisation est controversée. Ils se dégradent assez rapidement et peuvent libérer des fils de fer de leur armature. L'ingestion de ces corps étrangers par les animaux lors de la consommation de l'ensilage est donc un risque possible. Il va de soi que la lutte contre les rongeurs est indispensable pour éviter d'endommager la bâche, ce qui entraînerait une rupture des conditions d'anaérobiose, mais représenterait aussi une source possible d'inoculation de germes, potentiellement pathogènes.

d. Distribution au troupeau

Lorsqu'on ouvre un silo pour la première fois, on y laisse pénétrer de l'air et on rompt l'anaérobiose créée précédemment. C'est l'élément principal qu'il va falloir gérer pendant toute la durée d'utilisation du silo. Au sommet, il faut former un liseré le long du front d'attaque avec des sacs de sable afin d'éviter que de l'air ne puisse pénétrer jusqu'au fond du silo ce qui altérerait la qualité de l'ensilage restant.

Pour limiter l'altération de l'ensilage et le développement de micro-organismes suite à l'aérobiose créée, il est important de ne pas laisser stagner le front d'attaque. Il est conseillé d'assurer une avancée de 15 centimètres par jour minimum en hiver et d'au moins 25 centimètres en été, pour limiter le risque de développement de germes aérobies (Laignel, Morazin 2020).

En cas de visualisation de parties altérées sur le front de coupe, il convient de les retirer avant la distribution aux animaux.

De plus, lorsque l'ensilage est mélangé avec le reste de la ration en utilisant une mélangeuse, il est important de ne pas laminer les particules d'ensilage et de maintenir une granulométrie idéale afin de limiter le tri à l'auge.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la réalisation d'un bon ensilage nécessite la maîtrise d'un grand nombre de paramètres, depuis le choix de la parcelle et de la variété jusqu'à la préparation du silo, en passant par la conduite de la récolte. En effet, l'ensilage va être le siège de nombreuses réactions chimiques d'origine biologiques et c'est leur bon déroulement qui permettra d'obtenir un aliment de qualité nutritionnelle intéressante en élevage. Nous allons maintenant détailler ces réactions et leurs conséquences sur l'aliment.

1.5 Évolution des caractéristiques physico-chimique de l'ensilage au cours du temps

Suite à la mise en silo de l'ensilage de maïs, on observe plusieurs phénomènes : un tassement du fourrage, une élévation de la température et un écoulement de jus. Ces changements traduisent l'évolution biochimique et bactérienne de l'ensilage, du fait de l'activité enzymatique des cellules végétales et microbiennes.

On distingue deux phases principales dans l'évolution du fourrage : la phase initiale enzymatique et la phase fermentaire sous l'action de bactéries.

a. Phase initiale : activité enzymatique

Au début du stockage, il y a toujours de l'oxygène et de l'eau dans les cellules végétales. Grâce à ces éléments, les cellules du maïs vont poursuivre leur activité métabolique d'hydrolyse. Cela permet de transformer les glucides solubles en glucose et fructose. En présence d'oxygène, ces sucres sont ensuite consommés afin de produire de l'eau, du dioxyde de carbone et de la chaleur : c'est la respiration cellulaire dont la réaction globale est présentée ci-dessous.



L'amidon n'est pas utilisé pour ce type de réaction.

Ces réactions de respiration entraînent une libération importante de chaleur, toujours en présence d'oxygène résiduel. Cela entraîne alors une lyse des lysosomes contenus dans les cellules végétales, libérant les enzymes qu'ils contiennent et en particulier des hydrolases. De nouvelles réactions apparaissent alors : les réactions de protéolyse. Lors de cette étape, les protéines sont transformées en peptides qui sont eux-mêmes transformés en acides aminés en libérant de l'ammoniac.

Ces réactions provoquent peu à peu la destruction des cellules végétales qui vont libérer leur contenu formant les jus d'ensilage.

Au bout de 24 heures environ, les micro-organismes vont entrer en jeu et être responsables de nouvelles réactions chimiques.

b. Phase fermentaire : activité bactérienne

Suite à la phase enzymatique, la quantité de sucres solubles et d'oxygène disponibles dans le fourrage ont diminué, mais le pH de l'ensilage est toujours élevé. Ces conditions environnementales associant une teneur résiduelle en oxygène suffisante et un pH suffisamment élevé vont permettre le développement de la flore aérobie. Les premiers coliformes se développent généralement au bout de 24 heures.

Fermentation acétique

Ce type de fermentation est réalisée par les entérobactéries de type *Enterobacter* et *Klebsiella*. Ces bactéries utilisent l'oxygène résiduel et les glucides solubles pour produire du gaz carbonique, des alcools, mais surtout de l'acide acétique, ce dernier induisant un début d'acidification du fourrage. Elles dégradent également les matières azotées en formant de l'ammoniac.

Au bout de 48h, les streptocoques prennent le relais des coliformes pour réaliser le même type de réaction. Ils sont néanmoins inhibés au bout de 72h maximum du fait de l'acidification croissante du milieu (Galtier et al. 2006).

Tant qu'il reste de l'oxygène résiduel, les réactions de fermentation ne sont pas intéressantes pour la conservation. Elles entraînent une diminution de la teneur en matière sèche du fourrage et le ralentissement de l'acidification du fourrage en consommant les glucides solubles nécessaires à la fermentation lactique. Ce n'est que lorsque l'oxygène aura été

consommé en quasi-totalité que les réactions chimiques vont devenir bénéfiques à la conservation de l'ensilage de maïs. Ce constat renforce encore l'intérêt de limiter au maximum, dès le départ, la quantité d'oxygène disponible en maîtrisant la teneur en matière sèche, le tassement et la mise sous bâche.

Fermentation lactique

La fermentation lactique est une étape majeure dans la fabrication d'un bon ensilage. Elle est primordiale pour sa bonne conservation.

Pour le bon déroulement de cette fermentation, il est nécessaire d'avoir un milieu contenant une très faible concentration en oxygène car les bactéries lactiques sont aérotolérantes, anaérobies facultatives : elles ne tolèrent que de très faibles concentrations en oxygène. De plus, il faut une température comprise entre 10 et 40°C, une quantité suffisante de sucres fermentescibles et un pH inférieur à 6. Plus cette étape interviendra rapidement et dans des conditions idéales, plus l'ensilage s'acidifiera rapidement, et plus on aura un blocage du développement de la flore indésirable et une bonne stabilisation de l'ensilage sur la durée.

Deux types de bactéries vont être impliquées dans ce processus : les bactéries homofermentaires et les bactéries hétérofermentaires.

- Les bactéries homofermentaires produisent à 90% de l'acide lactique à partir de glucose et de fructose. C'est le cas de *Lactobacillus casei* et de *Lactobacillus plantarum* qui réduit également les nitrates en nitrites et ammoniac.
- Les bactéries hétérofermentaires produisent, quant à elles, toujours à partir de glucose et fructose, de l'acide lactique à 45%, de l'acide acétique, de l'éthanol, de l'hydrogène et du gaz carbonique. C'est le cas du genre *Leuconostoc* et de *Lactobacillus brevis* par exemple.

Lorsque les conditions du milieu sont optimales, qu'on a des fourrages riches en glucides fermentescibles, on obtient un taux d'acide lactique de 4% de la matière sèche en 5 jours et une stabilisation à 6-7% en deux mois. Dans des conditions défavorables, il est possible d'atteindre ce taux de 4% uniquement au bout d'un mois, ce qui peut laisser le temps pour le développement d'une flore indésirable.

Cette fermentation lactique va donc dépendre des conditions du milieu. Afin de limiter les risques liés à l'hétérogénéité des matières premières, on peut avoir recours à des agents d'ensilage (composants chimiques), qui, au besoin, complètent l'action des bactéries lactiques en favorisant la fermentation lactique comme nous le verrons par la suite.

En conclusion, comme nous l'avons déjà souligné à plusieurs reprises, il est fondamental de maîtriser l'anaérobiose du silo car c'est ce qui conditionnera en grande partie la qualité finale de l'ensilage de maïs en orientant les fermentations comme le montre le tableau 4.

Tableau 4 - Évolution enzymatique et microbiologique d'un fourrage ensilé (Paragon et al. 2004)

Phase et ferments mis en jeu	Conditions de développement				Substrats attaqués et résultats	Conséquences
	pH	Température (°C)	H2O	O2		
Enzymatique						
Hydrolyse des glucides Respiration Protéolyse	>3 >4	20-30	+++	+++	Glucides solubles --> glucose, fructose Glucose, fructose + O2 --> eau + CO2 + chaleur Protéines --> acides aminés	Perte de MS ↓ teneurs sucres fermentescibles Échauffement du fourrage Solubilisation de l'azote
Fermentaire						
ACÉTIQUE 2. Coliformes 24-48h 3. Streptocoques 48-72h	>5,5	20-40	+++	+/-	Glucides solubles --> ac.acétique + alcool + CO2	Perte de MS Ensilage inappétant Acidification faible
LACTIQUE 3-5j Homofermentaire : <i>L.plantarum</i> Hétérofermentaire : <i>L.brevis</i>	<5	10-50	+/-	-	Glucides solubles --> ac.lactique seul Glucides solubles --> ac.lactique + ac.acétique + alcool + H2 + CO2	Acidification maximale et rapide Acidification submaximale + lente

1.6 Qualité de l'ensilage de maïs et conservation dans le temps

a. Évaluer la qualité d'un ensilage

L'ensilage peut constituer une part importante de la ration des animaux, en particulier en hiver. De ce fait, de nombreuses études ont visé à établir un barème d'évaluation de leur qualité finale. Cela, permet de juger à la fois de la conservation et de la bonne valeur alimentaire du fourrage.

Nous allons présenter ici le barème de l'INRAE qui répertorie six paramètres principaux dont les valeurs sont présentées dans le tableau 5 :

- Le pH
- La teneur en acide lactique
- La teneur en acide acétique
- La teneur en acide butyrique

- La teneur en azote ammoniacal
- La teneur en alcool

Tableau 5 - Barème INRA d'appréciation de la qualité de conservation d'un ensilage de maïs (Paragon et al. 2004)

Appréciation	pH*	AGV totaux (mmoles/kg MS)	Acide lactique (g/kg MS)	Acide acétique (g/kg MS)	Acide butyrique (g/kg MS)	Azote ammoniacal (%NT)	N soluble (%N total)
Excellent	<4	<330	40-80	<20	0	<5	<50
Bon	<4,2	330-660	/	20-40	<5	5-10	50-60
Médiocre	<4,4	660-1000	/	40-55	>5	10-15	60-65
Mauvais	<5	1000-1330	/	55-75	>5	15-20	>65
Très mauvais	>5	>1330	/	>75	>5	>20	>75

* Valeurs proposées pour des ensilages dont la teneur en MS est \leq à 35 %. Si la MS est $>$ 35 %, le pH n'est plus un indicateur valide de conservation. (AGV = Acides Gras Volatils)

Le pH est le critère principal à contrôler pour évaluer la bonne qualité d'un ensilage. C'est un indice de l'acidification, plus le pH est bas, meilleure a été la conservation. Sa valeur idéale se situe en dessous de 4 quand la teneur en matière sèche du fourrage est optimale. Néanmoins, il ne doit pas non plus être trop faible sinon la croissance des lactobacilles est inhibée et la consommation du fourrage par les ruminants entraîne une acidification du rumen. De ce fait, en cas de valeur trop basse, on peut utiliser des substances tampons à base de bicarbonates dans la ration. Le pH peut être mesuré en envoyant un échantillon du front d'attaque au laboratoire ou à l'aide un pH-mètre portatif directement sur la ferme.

Le principal facteur de modification du pH est l'acide lactique produit par les bactéries lactiques lorsqu'elles consomment le glucose. Cet acide est produit lors d'une bonne fermentation, dans un ensilage bien conservé, il représente plus de 65% des AGV produits. Si le pH baisse rapidement en dessous de quatre c'est que la production d'acide lactique est correcte.

Pour ce qui est de l'acide acétique, on retrouve une concentration élevée dans l'ensilage ($>$ 5-6% MS) lorsque ce dernier est très humide ($<$ 25% MS) ou que l'acidification ou la compaction sont inadéquates. Sa présence montre une consommation excessive du glucose par les entérobactéries au détriment des lactobacilles. De fait, cela entraîne des pertes en matière sèche et en énergie du fourrage pendant la fermentation. Cependant, la présence d'acide acétique inhibe les levures lors de l'ouverture du silo, ce dernier est donc plus stable. Tout est

donc une question de quantité. Lorsque les teneurs sont trop élevées il est conseillé de réduire la proportion donnée aux animaux, d'aérer le fourrage pour permettre l'évaporation de l'acide et d'ajouter des bicarbonates à la ration pour limiter son acidité (Valacta 2017).

L'acide butyrique, quant à lui, indique une fermentation par les clostridies et ne devrait donc pas être supérieur à 0,5% MS. Ces ensilages ont généralement une mauvaise valeur alimentaire puisque les clostridies consomment les sucres et les protéines contenus dans les cellules végétales.

La proportion d'azote ammoniacal dans un bon ensilage est comprise entre 4 et 7 % de l'azote total. Au-delà de 10-20 % cela signifie qu'il y a une protéolyse trop importante par des bactéries butyriques de type *Clostridium*.

Pour finir, l'alcool sous forme d'éthanol est produit par les bactéries lactiques et les levures. L'excès d'éthanol dans la ration peut avoir un effet sur le fonctionnement hépatique et entraîner une baisse de production laitière. L'alcool diminue également l'appétence de l'aliment. Le taux d'alcool ne doit donc pas dépasser 25 g par kg de MS.

Un autre critère influence la qualité de l'ensilage ainsi que sa conservation : l'ingestibilité qui est corrélée à la granulométrie de la ration. Plus le fourrage est coupé fin, plus il est facile de le tasser et, de ce fait, d'obtenir une anaérobiose correcte. Il faut cependant être vigilant puisque, plus les brins sont courts, moins l'animal va ruminer. Il est donc important de ne pas non plus hacher trop finement les plantes.

Pour un ensilage de maïs distribué à des vaches laitières, (institut de l'élevage AGPM 1995 p52) on conseille :

- Moins de 1% de particules grossières de plus de 2 cm
- 8 à 12% de particules moyennes de 1 à 2 cm
- Moins de 50% de particules très fines de moins de 6 mm

De plus, la coupe doit être homogène pour éviter un tri à l'auge trop important.

b. Inoculants et conservateurs

Comme nous l'avons vu, la fabrication d'un bon ensilage nécessite la maîtrise d'un certain nombre de points clés, en particulier à la récolte et au moment de la préparation du silo.

Certains additifs peuvent être utilisés pour améliorer la qualité de l'ensilage et/ou faciliter sa conservation. Ces molécules, ajoutées au fourrage, permettent en effet d'améliorer la qualité de conservation, de maintenir des nutriments de bonne qualité, de diminuer les pertes en matière sèche du fourrage et jouent sur la teneur azotée de ce dernier. *In fine*, cela peut permettre d'améliorer les performances des animaux.

Conservateurs bactériens

Le maïs, comme tous les végétaux, présente à sa surface, avant récolte, un certain nombre de micro-organismes. On retrouve notamment des bactéries homofermentaires qui produisent de l'acide lactique comme vu précédemment. Si on rajoute ce type de bactéries au fourrage au moment de la récolte, la fermentation est activée plus rapidement dans le silo et on diminue donc les risques de voir proliférer une flore indésirable. Les autres types de bactéries retrouvées sur les plants et inoculables sont les bactéries hétérofermentaires qui produisent de l'acide lactique et de l'acide acétique, ce dernier étant un puissant inhibiteur des levures et moisissures (Valacta 2017). Parmi elles, *Lactobacillus buchneri* est retrouvée dans de nombreux produits commerciaux.

On peut trouver sur le marché des produits qui regroupent à la fois des bactéries homofermentaires et hétérofermentaires. Ces additifs sont recommandés pour les ensilages qui s'échauffent rapidement, notamment ceux ouverts pendant l'été ou ceux qui sont consommés lentement et pour lesquels les risques de développement de levures ou de moisissures sont plus importants. Néanmoins, cette production ne sera en quantité suffisante qu'au bout d'un certain temps, lorsque les bactéries se seront bien développées. De ce fait, elles nécessitent une inoculation d'au moins deux mois dans le silo pour produire une quantité d'acide acétique suffisante pour inhiber les germes indésirables : l'inoculant est donc ajouté par pulvérisation au moment de la récolte.

Comme on peut le constater sur le tableau 6, la dose de bactéries utilisée va avoir un impact sur les paramètres de fermentation : il est donc important de respecter les doses prescrites par le fabricant et d'appliquer ces additifs de manière homogène dans le silo (Kleinschmit, Kung 2006). Pour ce faire, des réservoirs sont présents sur les ensileuses, ce qui permet de pulvériser l'additif en fines gouttelettes directement lors de la récolte.

Tableau 6 - Impact de la dose appliquée de *Lactobacillus buchneri* sur différents paramètres de fermentation et de conservation de l'ensilage de maïs (Kleinschmit, Kung 2006)

Paramètres mesurés	Sans inoculant	<i>Lactobacillus buchneri</i> (UFC/g)*	
		≤100 000	>100 000
Matière sèche (%)	30,7 ^a	30,7 ^a	30,7 ^a
pH	3,70 ^a	3,75 ^b	3,88 ^c
Acide lactique (% MS)	6,59 ^a	5,87 ^b	4,79 ^c
Acide acétique (% MS)	2,18 ^a	2,63 ^b	3,89 ^c
Matière sèche récupérée (%)	95,5 ^a	95,5 ^a	94,5 ^b
Levure (log UFC/g)	4,18 ^a	3,10 ^b	1,88 ^c
Stabilité aérobie (heures)	25 ^a	35 ^b	503 ^c

^{a,b,c} Pour un critère donné, les moyennes suivies d'une lettre différente diffèrent à un seuil de P < 0,05.

* UFC : Unités formatrices de colonie

Conservateurs chimiques

Les acides sont également utilisés comme conservateur de silos. Parmi les plus utilisés on retrouve l'acide formique et l'acide propionique.

Leur ajout fait baisser le pH dès leur application, ce qui oriente le processus de conservation vers la fermentation lactique qui se déroule à pH bas. Lorsque l'éleveur est en manque de fourrage et qu'il ne peut pas attendre trois semaines avant d'ouvrir le silo, ces additifs sont une bonne alternative. Ces acides sont souvent tamponnés pour être moins corrosifs pour le matériel lors de l'application. Pour ce qui est de l'acide propionique, il a également une valence antifongique. L'acide formique, lui, a une action anti-levure. Leur action est donc aussi intéressante lors de l'ouverture du silo et de l'oxygénation qui suit et qui peut permettre le développement de ces organismes aérobies (Arvalis 2022).

Un autre additif possible est l'azote non protéique ajouté sous forme d'ammoniac ou d'urée (Fournier 2016). Il a pour but premier d'enrichir le fourrage en protéines brutes : les ruminants transforment l'azote non protéique grâce à la flore ruminale. De plus, l'ammoniac agit comme agent de conservation grâce à sa valence antifongique. Néanmoins, il faut être prudent car, si le maïs a été fortement fertilisé à l'azote ou qu'il a connu une période de sécheresse, il peut déjà contenir une forte teneur en nitrates, ce qui peut causer des problèmes de santé aux ruminants le consommant. L'ammoniac améliore également, d'une part la digestibilité du fourrage du fait de son action sur l'hémicellulose et la paroi cellulaire et, d'autre part, il inactive les enzymes protéolytiques présentes dans la plante juste coupée. De ce fait, cela préserve une partie des protéines contenues dans l'ensilage de maïs. (Fournier 2016). Le tableau 7 récapitule le rôle de différents additifs de l'ensilage de maïs.

Tableau 7 - Les additifs d'ensilage du maïs fourrage, description, principaux mécanismes et objectifs recherchés (Arvalis 2018)

"Classe" d'additifs d'ensilage	"Sous-classe" d'additifs d'ensilage	Principales espèces ou molécules	Principaux mécanismes	Objectifs recherchés
Biologique	Bactéries lactiques homofermentaires	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus lactis</i> , <i>Pediococcus acidilactici</i> , <i>Pediococcus pentosaceus</i>	Sucres simples => acide lactique	Baisse du pH
Biologique	Bactéries lactiques hétérofermentaires	<i>Lactobacillus buchneri</i> , <i>Lactobacillus brevis</i>	Sucres simples => acide lactique, acide acétique, alcools, CO ₂ , 1,2-propanediol	Stabilité aérobie Baisse du pH
Chimique	Acides organiques	Acide formique		Baisse du pH
Chimique	Acides organiques	Acide propionique		Stabilité aérobie Baisse du pH
Enzymes		Cellulase, hémicellulase, amylase	Sucres complexes => sucres simples	Mise à disposition de sucres aux bactéries lactiques

Nous avons vu les intérêts possibles à utiliser des additifs lors de la confection de l'ensilage de maïs. Néanmoins, ces aides ne peuvent se substituer au respect des bonnes pratiques de préparation et de conservation de l'ensilage, qui restent les éléments clés.

Comme nous l'avons vu, la préparation d'un bon ensilage de maïs plante entière repose sur un savoir-faire technique permettant, par la suite, le bon développement d'une flore utile, qui va, à son tour, par ses capacités métaboliques, modifier les caractéristiques physico-chimiques initiales de la matière première et permettre ainsi sa conservation et son utilisation différée dans le temps. Cependant, un certain nombre de dangers, de nature diverse, peuvent aussi être présents. Nous allons maintenant décrire les différents contaminants pouvant s'y trouver et leur impact possible sur la santé animale, voire sur la santé humaine en cas de transfert dans les produits laitiers.

- PARTIE 2 –

2. LES CONTAMINANTS POSSIBLES DE L'ENSILAGE DE MAÏS

Nous avons vu dans la partie précédente que la fabrication de l'ensilage de maïs est complexe et que de nombreux paramètres, de la parcelle à la conduite du stockage et à l'utilisation, doivent être maîtrisés pour assurer la qualité sanitaire et nutritionnelle de cet aliment. Les contaminants possibles sont nombreux et sont de différentes natures : microorganismes, plantes toxiques, dangers chimiques présents dans les matières premières (pesticides, mycotoxines) ... La présence de ces différents contaminants peut avoir des conséquences néfastes sur la santé des animaux et diminuer la valeur nutritionnelle de l'ensilage.

Dans cette partie, nous allons détailler les principaux contaminants possibles et précisant leur origine et les particularités physiologiques permettant leur présence et, éventuellement, leur développement dans l'ensilage. Cela nous permettra, dans la partie suivante, d'identifier les mesures préventives et les contrôles à mettre en place pour garantir la sécurité et la qualité de l'aliment. Pour chaque contaminant, nous préciserons aussi ses effets possibles sur la santé des animaux et celle de l'Homme.

2.1 Les contaminants microbiologiques

Les risques microbiens peuvent être classés en différentes catégories : les contaminants issus de la matière première, c'est-à-dire, présents sur la plante ou dans le sol avant la récolte et les contaminants qu'on retrouve dans l'environnement agricole en lien direct avec la présence des animaux sur l'exploitation.

a. Les contaminants bactériens

Que ce soit dans les champs cultivés ou les exploitations agricoles, de nombreux germes sont présents dans l'environnement. Néanmoins, dans notre cas, seuls ceux identifiés comme des contaminants fréquents de l'ensilage de maïs et ayant un impact sur la santé animale et/ou humaine nous intéressent. Afin de définir les principaux contaminants possible de l'ensilage de

maïs, nous nous sommes basés sur différentes enquêtes scientifiques (Queiroz et al. 2018, Driehuis et al. 2018, Dunière et al. 2013, Paragon et al. 2004 et Driehuis 2013), qui rapportent, de façon systématique la présence de certaines bactéries du genre *Clostridium*, de *Listeria monocytogenes*, de *Bacillus cereus*, d'*Escherichia coli* et de *Salmonella spp.* Ce sont donc ces bactéries que nous allons présenter plus en détail.

❖ *Salmonella spp.*

Données microbiologiques générales

Les salmonelles sont des bactéries de la famille des *Enterobacteriaceae* et du genre *Salmonella*. Elles sont aéro-anaérobie facultatives (ANSES 2021a). Au sein de ce genre, on rencontre deux espèces : *Salmonella enterica* et *Salmonella bongori*. L'espèce *S. enterica* comporte six sous-espèces : *enterica*, *salamae*, *arizonae*, *diarizonae*, *houtenae*, *indica*. Dans chaque espèce, il existe différents sérotypes identifiés selon leurs antigènes somatiques (O) ou flagellaires (H).

L'habitat naturel des Salmonelles est le tube digestif des animaux. Ce sont des germes mésophiles dont la température optimale de développement est comprise entre 35 et 40°C et le pH optimal de croissance est compris entre 6,5 et 7,5. Néanmoins, ces bactéries peuvent continuer à se développer à des conditions extrêmes : entre 5°C et 45°C pour la température et jusqu'à 4,5 pour le pH (Ministère de l'Agriculture 2019). Ces caractéristiques expliquent que les salmonelles sont très résistantes dans l'environnement et qu'elles peuvent survivre dans l'ensilage de maïs en cas d'acidification légèrement trop faible.

Principales sources de contamination

Les animaux, qu'ils soient sauvages ou domestiques, sont les principales sources de salmonelles. En général, ils sont porteurs sains au niveau du tractus gastro-intestinal et peuvent excréter ces bactéries de manière intermittente. On retrouve alors des salmonelles dans les matières fécales, qui peuvent ensuite contaminer l'environnement agricole : effluents d'élevage, eaux usées, pâturages et sols, et ce pendant plusieurs mois. De ce fait, pour ce qui est de l'ensilage, les bactéries peuvent se retrouver dans les champs lors de l'épandage de fumier contaminé (Ruoho 2007). Elles peuvent aussi contaminer le silo en cas d'attaque de rongeurs ou lors de l'ouverture, si le matériel agricole utilisé est contaminé.

Impact sur la santé animale

Deux situations sont possibles : soit les bovins sont porteurs sains, soit ils déclarent la maladie. Dans ce second cas, on parle de salmonellose, ce qui provoque de fortes diarrhées, parfois sanglantes, des avortements, de l'hyperthermie, une baisse de production laitière et même, fréquemment, la mort de l'animal. On peut retrouver jusqu'à plusieurs milliards de salmonelles par gramme de bouse ou de placenta issus des animaux malades, ce qui entraîne une dissémination massive des germes et rend possible la contamination des autres animaux de l'exploitation (GDS Savoie 2017). Cependant, le portage sain par les animaux reste le cas le plus fréquent. Ce portage sans signe clinique peut entraîner une contamination des produits animaux (lait en particulier) si l'hygiène de la traite n'est pas rigoureusement maîtrisée.

Impact sur la santé humaine

Pour ce qui est de l'impact chez l'Homme, *Salmonella enterica subsp. enterica* est considérée comme la plus pathogène (Brenner et al. 2000) : les sérotypes les plus importants transmis par l'espèce bovine étant *Salmonella* Typhimurium et Dublin.

La voie de transmission la plus fréquente des bactéries de l'animal à l'homme est liée à la consommation d'aliments d'origine animale contaminés, et notamment du lait et des produits laitiers n'ayant pas subi de traitement thermique. La contamination est alors liée à l'hygiène de traite. Cependant, la contamination directe du lait est aussi possible car les vaches peuvent excréter des salmonelles dans le lait lors de mammites subcliniques. L'Homme peut également se contaminer directement via les animaux ou d'autres personnes infectées.

L'Homme développe, suite à l'ingestion des bactéries, une gastro-entérite aiguë fébrile. Généralement, la guérison spontanée survient en quelques jours. Néanmoins, une forme septicémique est possible chez les personnes fragiles (nourrissons, personnes âgées ou immunodéprimées) et, dans ce cas, une hospitalisation est nécessaire.

La salmonellose humaine est une maladie surveillée. C'est une maladie à déclaration obligatoire dans le cadre des toxi-infections alimentaires collectives (TIAC).

❖ *Listeria monocytogenes*

Données microbiologiques générales

Listeria monocytogenes fait partie de la famille des *Listeriaceae* et du genre *Listeria*. Le genre *Listeria* comporte 21 espèces, mais *L. monocytogenes* est la seule pathogène pour l'Homme.

Cette bactérie est aéro-anaérobie et se développe idéalement à une température entre 30 et 37°C avec un pH neutre à 7 (ANSES 2020). Sa résistance dans le milieu extérieur explique sa prévalence élevée en élevage. C'est une bactérie psychrotrophe, capable de croître même lorsque la température est basse, jusqu'à -2°C. Elle peut se développer également à des pH acides jusqu'à 4, mais est inhibée en dessous de ce seuil. Une étude a montré que *L. monocytogenes* est détectée dans 29,5% des ensilages dont le pH est supérieur à 4,5 contre seulement 6,2% dans les ensilages de pH inférieur (Vilar et al. 2007).

Principales sources de contamination

Listeria monocytogenes une bactérie ubiquitaire, tellurique, qu'on retrouve dans l'environnement. Elle est saprophyte et peut se développer sur la matière végétale en décomposition. Ainsi, selon une étude, *L. monocytogenes* n'est pas présente sur les plants avant la récolte, mais se développe plutôt 24 heures après la coupe (Fenlon, Wilson, Donachie 1996). Du fait de sa grande résistance dans l'environnement, c'est un germe qu'on retrouve fréquemment dans le sol, les eaux de surface, les matières fécales et les végétaux en décomposition (Giraud et al. 2020). Elle est donc souvent incorporée dans l'ensilage lors de la récolte ou de la mise en silo. La contamination peut aussi avoir lieu à l'ouverture du silo, par le biais du matériel comme évoqué pour *Salmonella*. Le développement aura lieu lors du stockage s'il y a une mauvaise acidification du silo.

Impact sur la santé animale

En cas de présence dans l'ensilage, *Listeria monocytogenes* peut avoir un fort impact sur la santé animale. La plupart des animaux contaminés ne sont pas malades. Ils sont porteurs sains au niveau du tube digestif et peuvent excréter les bactéries dans leurs fèces.

Néanmoins, la listériose clinique est possible et la mort de l'animal est alors fréquente.

Cette maladie prend principalement deux formes : cérébrale ou abortive. Les méningites entraînent une hyperthermie ainsi qu'une hémiplégie, notamment faciale. Elle conduit généralement à la mort de l'animal en quelques jours. Quant aux avortements, ils ont généralement lieu en fin de gestation. D'autres formes moins fréquentes existent : septicémie chez le jeune, conjonctivites ou mammites subcliniques. En cas de mammites subcliniques, on retrouve très souvent des bactéries dans le lait, ce qui peut alors représenter une voie de contamination des Hommes par ingestion de lait ou de fromages fabriqués au lait cru.

On observe une certaine saisonnalité en élevage. La prévalence de cette bactérie est supérieure lorsque les animaux sont nourris à base d'ensilage, ce qui confirme sa présence fréquente dans les silos. Une étude a montré qu'on retrouve *L.monocytogenes* trois à sept fois plus fréquemment dans les fermes où les animaux consomment de l'ensilage toute l'année puisque ces derniers deviennent excréteurs (Schoder et al. 2011).

Impact sur la santé humaine

La listériose est une maladie zoonotique. La transmission se fait dans 99% des cas via les aliments. Néanmoins, une transmission cutanéomuqueuse par contact avec des animaux infectés a déjà été observée (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire 2017).

Plusieurs formes symptomatiques existent chez l'Homme dont une forme digestive avec des troubles gastro-intestinaux et pseudo-grippaux. Néanmoins, on peut aussi observer, chez des personnes sensibles (femmes enceintes, personnes âgées, immunodéprimés) des formes invasives : septicémique (syndrome pseudo-grippal), cérébrale (méningo-encéphalite) ou materno-néonatale (prématurité, avortement, infection néonatale).

La listériose chez l'Homme est une maladie à déclaration obligatoire.

❖ *Escherichia coli*

Données microbiologiques générales

Escherichia coli fait partie, tout comme *Salmonella*, de la famille des *Enterobacteriaceae*. C'est donc un germe aéro-anaérobie dont l'habitat naturel est le tube digestif des animaux et de l'Homme. La plupart de ces bactéries ne sont pas pathogènes et les *E. coli* sont considérés comme des marqueurs d'hygiène de production dans la réglementation européenne. Cependant, certains sérotypes peuvent être pathogènes. On les classe en sept catégories, selon les signes cliniques qu'ils entraînent chez l'Homme : *E. coli* entéro-pathogènes (EPEC) ; *E. coli* producteurs de shiga-toxines (STEC) ; *E. coli* entérotoxinogènes (ETEC) ; *E. coli* entéroinvasifs (EIEC) ; *E. coli* entéroagréatifs (EAEC) ; *E. coli* adhérents diffus (DAEC) ; *E. coli* adhérents invasifs (AIEC) (Jesser, Levy 2020). En ce qui concerne l'ensilage, on retrouve les *E.coli* producteurs de shiga-toxines (STEC) et notamment le sérotype O157:H7 le plus fréquent chez l'Homme (Keen et al. 2010). Dans le cadre de l'ensilage de maïs, nous allons nous concentrer sur les *Escherichia coli* producteurs de shiga-toxines, aussi appelées STEC.

Les conditions optimales de développement des STEC sont une température d'environ 40°C et un pH de 6 à 7. Néanmoins, elles sont très résistantes dans l'environnement et peuvent survivre à de grands écarts de température et de pH. Les conditions extrêmes de croissance sont une température de 45,5°C et un pH à 4,4 (ANSES 2019). De ce fait, en cas de mauvaise acidification du silo, elles pourront se développer. Elles peuvent également survivre plusieurs semaines dans l'eau, le sol et les effluents d'élevage. Cela s'explique notamment par la capacité de ces bactéries à former des biofilms, les protégeant des processus de nettoyage-désinfection classiques sur le sol ou les machines à traire ce qui explique leur potentielle présence dans le lait au moment de la traite si les STEC sont présents dans l'environnement.

Principales sources de contamination

Les *Escherichia coli* peuvent contaminer les silos de plusieurs façons.

Initialement, les ruminants sont considérés comme le principal réservoir d'*E.coli* producteur de Shiga-toxines (Hussein 2007). Elles sont présentes de manière commensale sur toute la longueur de leur appareil digestif. Elles sont excrétées avec les matières fécales, ce qui génère une contamination environnementale (Chaucheyras-Durand, Dunière, Forano 2016). Une fois dans l'environnement, elles peuvent se disperser dans toute l'exploitation et contaminer l'ensilage par contamination croisée à partir du matériel. Elles sont généralement inoculées au moment de l'ouverture du silo via le matériel agricole. Une autre source de contamination environnementale est la faune sauvage. Il est rapporté qu'une transmission interspécifique de STEC entre les animaux sauvages et les ruminants domestiques est possible. Elle contribue à la circulation des souches dans l'environnement agricole (Singh et al. 2015).

La seconde source de contamination par *Escherichia coli* n'est autre que la matière première elle-même, c'est à dire les plants de maïs. En effet, ces bactéries peuvent aussi se retrouver dans les champs via l'épandage de fumier contaminé. Elles font alors partie de la microflore épiphyte des cultures : elles vivent de manière non parasitaire à la surface des plantes et peuvent être incorporées au fourrage lors de la récolte. De plus, des études ont montré que les végétaux sont capables d'internaliser les souches d'*E.coli* grâce à leurs racines (Bernstein et al. 2007). Même si les études sont peu nombreuses, cela pourrait suggérer qu'une fois que *E.coli* se retrouve dans les racines et les feuilles de la plante, il peut ensuite contaminer l'ensilage de maïs lors de la récolte.

Impact sur la santé animale

Une fois les bactéries présentes dans le silo, elles vont être consommées par les ruminants. Ces derniers sont porteurs sains, il n'y donc généralement pas d'impact des STEC sur leur santé.

Impact sur la santé humaine

Les *E.coli* producteurs de Shiga-toxines (STEC) et notamment le sérotype O157:H7 sont les plus fréquents chez l'Homme (Keen et al. 2010).

La principale voie de transmission à l'Homme est indirecte, via la consommation d'aliments d'origine animale dont les produits au lait cru ou d'eau de boisson. La transmission directe reste possible via le contact avec des animaux infectés et leurs fèces.

Les principaux symptômes chez l'Homme sont digestifs. Dans les cas les moins graves, on observe une simple diarrhée. Cependant, elle peut se transformer en colite hémorragique entraînant des douleurs abdominales sévères et éventuellement s'accompagner d'un syndrome hémolytique et urémique lié à une atteinte rénale, complication majeure de la toxi-infection.

❖ Les bactéries du genre *Clostridium*

Données microbiologiques générales

Plusieurs espèces du genre *Clostridium* peuvent contaminer les ensilages. Certaines peuvent être pathogènes en produisant des toxines, c'est le cas de *Clostridium botulinum* (Giraud et al. 2020). D'autres sont plutôt responsables d'altérations de l'ensilage ou, par contamination croisée, des produits laitiers comme les fromages, c'est le cas de *Clostridium butyricum* ou *Clostridium tyrobutyricum*.

Néanmoins, appartenant au même genre, ces espèces ont des caractéristiques physiologiques communes. Elles sont sporulées, ce qui leur confère une très grande résistance dans le milieu extérieur. Elles sont également anaérobies strictes car elles ne disposent pas de moyens de détoxifier les radicaux oxygénés, les formes végétatives sont donc tuées en présence d'oxygène.

Clostridium botulinum

De nombreuses souches de *Clostridium botulinum* existent. Néanmoins, chez les bovins on retrouve dans 88% des infections cliniques la souche produisant la toxine D (Boubet, GDS Creuse 2021). Cette souche croît de manière optimale lorsque la température est entre 37 et

40°C et que le pH est autour de 6,1-6,3. Elle peut cependant continuer à se développer tant que la température est supérieure à 15°C et que le pH est supérieur à 5,1. Pour la production de toxines, elle nécessite aussi une température supérieure à 15°C.

Clostridium butyricum et tyrobutyricum

Clostridium butyricum et *tyrobutyricum* sont des espèces qui croient de manière optimale à 37°C et pH 7. Cependant, ces espèces peuvent se développer entre 10 et 50°C et jusqu'à un pH de 4,6 (Popoff, Bouvet 2009).

Au-delà de ces conditions extrêmes, les clostridies ne se développent plus, mais restent présentes dans l'environnement sous forme de spores, ces dernières étant beaucoup plus résistantes que la forme végétative. Les spores de *Clostridium botulinum* résistent par exemple à une température de 90°C.

Sources de contamination

Que ce soit les germes butyriques ou botuliques, ils sont ubiquistes, fréquemment présents dans le sol ou l'eau. De ce fait, chez les bovins, la principale source de contamination est alimentaire. Lors d'une étude menée aux Pays-Bas (Notermans, Dufrenne, Oosterom 1981), des spores de *C. botulinum* ont été mises en évidence dans les fèces de certains bovins nourris à base d'ensilage et dans du lisier épandu sur les pâtures.

Impact sur la santé animale

Clostridium botulinum

Clostridium botulinum présente le plus grand risque pour la santé animale avec le développement du botulisme. Lorsque les conditions environnementales sont idéales, les cellules végétatives de la bactérie vont se multiplier et produire la toxine botulique. C'est lors de la consommation du fourrage contaminé par les toxines que l'intoxication des ruminants aura lieu. La toxine botulique engendre plusieurs symptômes en fonction de son type. Néanmoins, on retrouve le plus fréquemment des symptômes de parésie / paralysie musculaire flasque ou de mort subite. La guérison est très rare.

Clostridium butyricum et tyrobutyricum

Les germes butyriques en tant que tels ne présentent aucun risque pour la santé animale, ces derniers étant porteurs sains. Ils sont cependant excrétés dans l'environnement via leurs fèces. Les spores butyriques présentes dans le sol se retrouvent alors dans les fourrages lors d'incorporation de terre pendant la récolte. Les conditions environnementales au sein du silo peuvent permettre la germination des spores et la multiplication des cellules végétatives.

Les cellules végétatives de *Clostridium butyricum* ou *tyrobutyricum* sont saccharolytiques. Lorsqu'elles se multiplient, elles fermentent les sucres résiduels et l'acide lactique. Ce dernier est ensuite métabolisé en acide butyrique. Cela a pour conséquence, l'augmentation du pH du silo ; l'acide butyrique étant moins acidifiant que l'acide lactique. Au sein du silo, ces réactions chimiques entraînent une perte énergétique, une perte en matière sèche du fourrage ainsi qu'une forte odeur de celui-ci engendrant une baisse d'ingestion de l'ensilage par les ruminants (Lefebvre, Lafrenière 2015).

C'est lorsque la quantité d'acide butyrique est trop élevée dans le fourrage que cela peut engendrer des troubles de la santé animale. L'acide butyrique en excès est transformé par le foie en bêta-hydroxybutyrate, engendrant une accumulation de corps cétoniques chez la vache et pouvant provoquer une cétose. De ce fait, il faut éviter de distribuer ce fourrage aux vaches tarées et à celles qui ont récemment vêlé, naturellement prédisposée à ce trouble métabolique (Lingaas, Tveit 1992).

Impact sur la santé humaine

Clostridium botulinum

Clostridium botulinum présente, comme chez les animaux, un risque sur la santé humaine. Les aliments sont la principale source de contamination par la toxine botulique. Les symptômes les plus graves sont neurologiques avec une paralysie musculaire plus ou moins intense, pouvant nécessiter la mise sous assistance respiratoire.

Clostridium butyricum et tyrobutyricum

Les germes butyriques de type *Clostridium butyricum* et *Clostridium tyrobutyricum*, ne constituent pas un danger pour la santé humaine puisque les spores ne traversent pas la paroi de l'intestin, elles se retrouvent juste dans les fèces. Il n'y a donc pas de signes cliniques lors de l'ingestion de spores butyriques. Mais ces espèces ont un rôle dans la salubrité lors de

confection de fromages. En effet, la présence de spores dans l'environnement ou les fèces peut entraîner la contamination du lait via le matériel (hygiène de traite). Une fois dans le lait, les spores présentes vont pouvoir se développer lors de la fabrication des fromages, en particulier de fromages à pâte cuite pour lesquels l'acidification, du caillé est faible et la présentation sous forme de meules de grande taille peut permettre l'anaérobiose nécessaire à la germination des spores. À partir de 2000 spores butyriques par litre de lait, la quasi-totalité des fromages gonflent pendant leur fabrication (Demarquilly 1998). En se développant, les bactéries produisent à partir des lactates de grandes quantités de gaz : dihydrogène et dioxyde de carbone provoquant le gonflement des meules, qui ne sont plus commercialisables, engendrant un fort préjudice économique (Rouillé et al. 2012).

❖ *Bacillus cereus*

Données microbiologiques générales

Bacillus cereus appartient à la famille des *Bacillaceae*. C'est un bacille aéro-anaérobie et sporulé.

Pour ce qui est de la forme végétative de la bactérie, elle se multiplie rapidement à des températures autour de 30-37°C et pour un pH de 6-7. Cependant, elle est capable de résister à des valeurs plus étendues, une température allant jusqu'à 55°C et un pH acide de 4,3, ce qui en fait une bactérie assez résistante dans l'environnement. Elle est cependant, assez sensible au froid puisqu'elle ne se développe pas en dessous de 7°C. Sous forme sporulée, elle va être encore plus résistante. Elle est, par exemple, thermorésistante jusqu'à 120°C pour certaines souches (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire 2011; ANSES 2021b) et peut supporter une acidification jusqu'à pH 2 (Ceuppens et al. 2012). De ce fait, les spores résistent très bien dans les silos d'ensilage de maïs. Néanmoins, la production de toxines a lieu essentiellement entre 20 et 25°C et elle est diminuée lorsque le pH est inférieur à 4,3.

Principales sources de contamination

Le sol est le réservoir principal des spores de *B. cereus*. En fonction du type de sol, on peut retrouver de 10^4 à 10^5 spores par gramme (Driehuis et al. 2018). C'est cette contamination tellurique qui peut être à l'origine de la contamination de l'ensilage de maïs. Dans une étude réalisée aux Pays-Bas, des concentrations allant même jusqu'à 10^8 - 10^9 spores par gramme ont

été mises en évidence dans les couches superficielles du fourrage, probablement en lien avec la présence d'oxygène dans ces parties du silo (Pahlow et al. 2003).

Impact sur la santé animale

Dans un silo bien conservé, on retrouve donc principalement *Bacillus cereus* sous forme de spores. Lors de leur ingestion par les bovins, elles vont passer dans le tractus gastro-intestinal des bovins sans que ces derniers ne soient affectés. On aura seulement une excrétion fécale. En cas d'inoculation de la bactérie dans la mamelle (hygiène de traite), cette espèce peut être responsable de mammites, mais cela reste rare.

Impact sur la santé humaine

Diverses espèces de *Bacillus* peuvent être présentes dans les ensilages de maïs, comme *B. licheniformis*, *B. pumilus*, *B. coagulans*, *B. sphaericus*, *B. cereus* et *Paenibacillus polymyxa*. Néanmoins, la bactérie de ce genre qui est la plus préoccupante chez l'Homme est *Bacillus cereus*. Il est producteur de toxines responsables de toxi-infections alimentaires. En fonction des toxines ingérées, *Bacillus cereus* est responsable d'intoxinations engendrant des symptômes diarrhéiques ou des symptômes émétiques (Agence de la santé publique du Canada 2012). La contamination humaine peut se faire via les produits laitiers. Les cellules végétatives de *Bacillus cereus* ne survivent généralement pas à la pasteurisation du lait, mais cette bactérie est capable de produire un biofilm sur le matériel de transformation. Si la bactérie et son biofilm sont introduits dans le lait, cela les protège de la pasteurisation. De ce fait, on peut retrouver soit directement la bactérie et son biofilm dans l'aliment soit ses spores et ce malgré le traitement thermique (Cressey, King, Soboleva 2016). Chez l'Homme, les troubles sont essentiellement dues aux toxines diarrhéiques (Nguyen-The, Carlin, Guinebretière 2003; Agriculture, Pêcheries et Alimentation Québec 2021).

❖ Bilan des risques bactériens

Le tableau 8 récapitule les principales caractéristiques des bactéries pathogènes que l'on peut retrouver dans l'ensilage de maïs.

Tableau 8 - Principales caractéristiques des bactéries pouvant contaminer l'ensilage de maïs

Bactérie	Données microbiologiques	Conditions de développement (T°C, pH, A _w)			Source du danger	Effets sur la santé		
		Minimal	Optimal	Maximal		Animale	Humaine	
<i>Escherichia coli</i>	Bacille 2-4µm x 0,6µm Gram – Aéro-anaérobie	6°C 4,4 0,95	40°C 6-7 0,995	45,5°C 9 /	Plante et Ferme	Porteur sain	Troubles gastro-intestinaux	
<i>Salmonella spp.</i>	Bacille 2-5µm x 0,7-1,5µm Gram – Aéro-anaérobie	5°C 3,8 0,94	35-37°C 7-7,5 0,99	50°C 9,5 >0,99	Ferme	Porteur sain ou troubles gastro-intestinaux	Gastro-entérite aiguë	
<i>Listeria monocytogenes</i>	Bacille 0,5-2µm x 0,5µm Gram + Aéro-anaérobie	-2°C 4-4,3 0,92	30-37°C 7 0,99	45°C 9,6 /	Sol Ferme	Porteur sain ou forme cérébrale	Troubles gastro-intestinaux	
<i>Bacillus cereus</i>	<i>Cellule végétative</i>	Bacille 3-4µm x 1µm Gram + Aéro-anaérobie	7-10°C 4,6 0,92	30-37°C 6-7 0,99-1	55°C 9,3 /	Sol Ferme	Porteur sain	Diarrhéique et émétique
	<i>Spores</i>		/	/	120°C*			
<i>Clostridium botulinum</i> (souche D)	<i>Cellule végétative</i>	Bacille 4-8µm x 0,75-1µm Gram + Anaérobies strictes	15 5,1 0,97	37-40 6,1-6,3 /	/	Sol Ferme	Paralyse flasque	Troubles gastriques Paralyse flasque
	<i>Production de toxines</i>		/	15 /	/			
<i>Clostridium butyricum et tyrobutyricum</i>	<i>Cellule végétative</i>	Bacille 4-8µm x 0,75-1µm Gram + Anaérobies strictes	10°C 4,6 /	37°C 7 0,952-0,971	50°C /	Sol Ferme	Porteur sain	Porteur sain
	<i>Spores butyriques</i>		/	/	/			
			4,6 /	5,8 /	7,5 /			

* Données variables en fonction des groupes génétiques de *B.cereus*

Il apparaît que, parmi ces bactéries, *Listeria monocytogenes* représente la plus grosse menace quant à la santé animale. En effet, les ruminants sont majoritairement porteurs sains des autres bactéries, ce qui n'impacte donc pas leur santé. Cependant, ils peuvent participer à la dispersion des bactéries dans l'environnement et à la contamination des aliments destinés à l'homme (lait, viande). En effet, à partir de l'environnement, on peut voir une contamination du matériel agricole et du lait notamment via les souillures de la machine de traite. Une fois contaminé, le lait peut présenter un risque pour la santé humaine en particulier s'il est consommé ou transformé sans traitement thermique préalable (produits au lait cru).

b. Moisissures

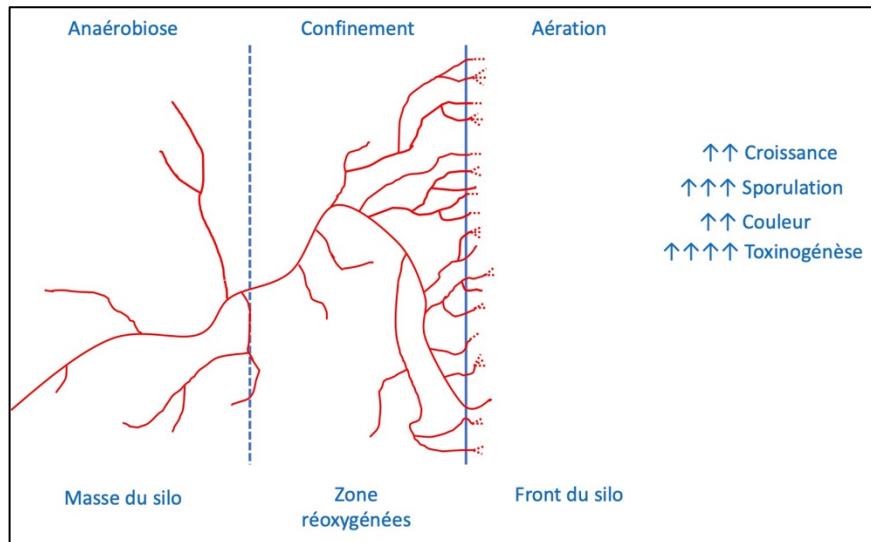
Les moisissures se développent principalement lorsque les conditions de réalisation de l'ensilage sont mauvaises. Elles entraînent généralement une diminution de l'appétence de l'ensilage, mais peuvent aussi être responsables de troubles pour la santé animale à cause de la production de mycotoxines. En effet, si les mycotoxines les plus connues et celles qui font l'objet de recommandations en alimentation animale sont, pour la plupart, produites au champ, sur les céréales avant la récolte, certaines espèces fongiques qui peuvent se développer sur l'ensilage pendant le stockage peuvent aussi produire certaines mycotoxines. Ces dernières sont souvent moins bien connues et non dosées par les laboratoires d'analyse, malgré leur effet possible sur la santé des animaux. Cependant, la présence de moisissures ne signifie pas toujours la présence de mycotoxines, car ce sont des métabolites secondaires, non indispensables au développement de la moisissure. Inversement, un ensilage non moisi peut contenir des mycotoxines si celles-ci ont été produites au champ, avant la récolte (voir plus loin) (Zain 2011).

De nombreuses espèces fongiques sont capables de se développer dans l'ensilage de maïs. Nous allons surtout nous intéresser à celles pouvant produire des toxines. Les principales moisissures qui se développent dans un ensilage mal maîtrisé selon différentes études, sont *Penicillium roqueforti*, *Penicillium paneum*, *Aspergillus fumigatus* et *Byssosclamyces nivea*. Les mycotoxines correspondantes sont donc les toxines trémorgènes et la patuline (Roigé et al. 2009; Driehuis et al. 2018; Driehuis 2013; Ogunade et al. 2018; Pahlow et al. 2003).

Conditions de développement

Les moisissures sont des microorganismes peu exigeants capables de se développer sur une grande variété de substrat. Leurs besoins sont un milieu aérobie et une activité en eau a_w supérieure à 0,7 (Ogunade et al. 2018). Il s'agit donc d'organismes aérobies stricts et, de ce fait, la teneur en oxygène sera le facteur principal influençant la croissance des moisissures dans l'ensilage. Il convient quand même de souligner que certaines espèces sont toutefois capables de se développer en présence de teneurs réduites en oxygène, comme *P. roqueforti*, utilisé en fabrication fromagère et qui se développe dans des cavités à l'intérieur des fromages, où la teneur en oxygène est limitée. En pratique, comme nous l'avons vu précédemment, les ensilages ne sont pas complètement anaérobies et contiennent toujours un peu d'air résiduel : tassement, étanchéité, ouverture du silo pour distribution etc. C'est suite à cette oxygénation que les spores fongiques initialement présentes peuvent se développer dans l'ensilage. Ce mécanisme est représenté sur la figure 11. En conditions normales, le développement mycélien des espèces

fongiques au sein du silo est lent et la sporulation est réduite du fait de la quasi-totale absence d'oxygène. Plus on arrive vers le front de coupe, plus les moisissures peuvent reprendre leur développement suite à l'augmentation de la teneur en oxygène. On a alors, une sporulation, l'apparition d'une couleur variable en fonction de l'espèce fongique liée aux mycéliums et, potentiellement, la production de toxines. Ce phénomène apparaît d'autant plus que l'avancée du front de coupe n'est pas suffisante, laissant le temps aux moisissures de se développer.



*Les flèches indiquent l'importance relative des changements apparaissant au niveau du front de coupe par rapport à la masse du silo.

Figure 11 – Développement d'une espèce fongique tolérante au confinement dans un silo d'ensilage de maïs (Bailly, Bailly 2017)

Le pH n'est pas, quant à lui, un facteur limitant le développement des moisissures, elles peuvent se développer dans une fourchette large de pH allant de 2 à 9 et donc ne sont pas gênées par l'acidification de l'ensilage (Ogunade et al. 2018).

Les moisissures se développent souvent sur le front de coupe et peuvent dégrader la qualité nutritionnelle et l'appétence du fourrage. De plus, en cas de production de mycotoxines, elles peuvent avoir un impact direct sur la santé animale. Chez les ruminants, la présence de la microflore ruminale permet une biodégradation de certaines mycotoxines qui vont être transformées en métabolites moins toxiques. Mais ce n'est pas une règle absolue et certaines mycotoxines peuvent avoir des effets néfastes chez les ruminants (Driehuis 2011).

❖ *Toxines trémorgènes*

Données microbiologiques générales

Les toxines trémorgènes sont produites principalement par des moisissures des genres *Aspergillus* et *Penicillium*. Les différentes toxines trémorgènes sont listées dans le tableau 9.

Tableau 9 - Moisissures productrices de toxines trémorgènes (Galtier et al. 2006)

Mycotoxine	Moisissures productrices
Penitrem A	<i>Penicillium cyclopium</i> , <i>P. verruculosum</i> , <i>P. crustosum</i>
Penitrem E	<i>P. crustosum</i>
Aflatrem	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>A. clavatus</i>
Roquefortine	<i>P. commune</i> , <i>P. palitans</i> , <i>P. crustosum</i> , <i>P. roqueforti</i>
Verruculogène	<i>P. verruculosum</i> , <i>P. simplicissimum</i> , <i>P. crustosum</i> , <i>A. caespitosus</i>
Verrucosidine	<i>P. verruculosum</i> var. <i>cyclopium</i>
Fumitremorgine A, B	<i>P. brasilianum</i> , <i>A. fumigatus</i> , <i>A. caespitosus</i> , <i>Neosartorya fischeri</i>

La roquefortine est l'une des plus fréquemment retrouvées dans l'ensilage. Il s'agit d'un métabolite secondaire de *Penicillium roqueforti*, qui est un contaminant fréquent de ce type de fourrage (Ogunade et al. 2018).

Impact sur la santé animale

Les cas d'intoxications rapportés chez les animaux de rente sont nombreux. Parmi les principales toxines en cause chez les animaux, on retrouve le penitrem A et la roquefortine. Le microbiote du rumen permet de détoxifier une partie des mycotoxines trémorgènes et diminue ainsi la sensibilité des adultes. Les signes cliniques apparaissent généralement une à deux semaines après l'ingestion de fourrages contaminés. Ils sont majoritairement nerveux avec des tremblements, contractions, incoordinations, convulsions etc. Il convient de souligner qu'il n'existe pas de données toxicologiques précises chez les ruminants. De ce fait, il n'y a pas de seuil toxique clairement identifié. De plus, la plupart des laboratoires ne sont pas en mesure de quantifier ces toxines, faute de standards disponibles. Ainsi, dans la plupart des cas, il s'agit de suspicions de mycotoxicoses, souvent confortées par la mise en évidence des espèces fongiques productrices, éventuellement du dosage des toxines, mais sans pouvoir se référer à des relations dose-effet bien établies.

Impact sur la santé humaine

Les toxines trémorgènes produites dans l'ensilage ne sont pas excrétées dans le lait des animaux. Ainsi, il n'y a pas de risque de transfert direct dans l'alimentation humaine. L'exposition des hommes aux mycotoxines serait plus liée à l'utilisation des souches toxigènes pour la fabrication fromagère. Cependant, les souches utilisées en fabrication fromagère sont sélectionnées pour leur absence de pouvoir toxigène. De plus, les conditions dans lesquelles elles sont placées (substrat très riche en protéines et très pauvre en glucide, contrairement à ce que l'on observe dans l'ensilage) ne sont pas favorables à la synthèse des mycotoxines. Il n'existe que peu de données toxicologiques chez l'homme concernant ces molécules. Elles seraient responsables de symptômes neurologiques allant de la confusion mentale à des tremblements, des crises d'épilepsie (Galtier et al. 2006).

❖ *Patuline*

La patuline a été initialement découverte pour ses propriétés antibiotiques envers les bactéries Gram positifs et négatifs. Cette toxine est notamment produite par des espèces des genres *Penicillium* et *Byssochlamys*. *Byssochlamys nivea* est le principal organisme responsable de la contamination de l'ensilage de maïs par cette mycotoxine. Son développement est idéal quand les températures sont comprises entre 20°C et 25°C et que le substrat contient des sucres solubles tel que le glucose. L'ensilage de maïs et d'herbe sont les deux principales sources de patuline en élevage (Giraud et al. 2020).

Impact sur la santé animale

L'ingestion de patuline chez les ruminants provoque des lésions digestives avec un impacts sur le foie, la rate et les reins (Organisation Mondiale de la Santé 2023). De plus, la patuline à 20 mg/L dans le rumen a un effet antibiotique sur les microorganismes du rumen ce qui inhibe partiellement la digestion ruminale (Galtier et al. 2006).

Impact sur la santé humaine

La patuline était utilisée en médecine humaine comme antibiotique. Or, des effets neurotoxiques ont été décrits dans les années 1950 d'où son retrait du marché et l'établissement de seuils maximaux tolérables dans les aliments selon le règlement (UE) 2023/915 (Règlement Européen 2023). En santé humaine, ce sont les pommes et produits à base de pommes qui sont les principales sources d'exposition. La toxine est alors produite par *Penicillium expansum*, le

principal contaminant de ces fruits. La patuline n'est pas excrétée dans le lait et ne risque donc pas de contaminer les produits laitiers par transfert depuis l'animal.

❖ *Bilan des risques fongiques*

Le tableau 10 présente les moisissures et les mycotoxines qui peuvent contaminer l'ensilage de maïs.

Tableau 10 - Principales moisissures pouvant contaminer l'ensilage de maïs et leurs mycotoxines

Moisissure	Mycotoxine produite	Localisation	Impact sur la santé		Références
			Animale	Humaine	
<i>Penicillium roqueforti</i>	Toxine trémorgène	Masse du silo	Diminution de l'appétence Signes nerveux	Neurotoxique	(Galtier et al. 2006) (Bailly, Bailly 2013)
<i>Penicillium paneum</i>	Patuline	/	Signes nerveux	Neurotoxique	
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Toxine trémorgène	Front de coupe	Agent de mycoses respiratoire et génitale Signes nerveux	Neurotoxique	
<i>Byssochlamys nivea</i>	Patuline	Masse du silo	Inrumination Météorisation Signes nerveux	Neurotoxique	

Les moisissures ne sont pas un risque en tant que tel pour la santé animale ou humaine. C'est la production de toxines par ces moisissures et leur fréquence qui présente un risque. La fréquence de présence de la roquefortine C et de la patuline sont présentés dans le tableau 11. Les niveaux de mycotoxine parfois retrouvés dans les ensilages peuvent être responsables d'intoxications aiguës en élevage.

Tableau 11 – Fréquence des différentes mycotoxines présentes dans l'ensilage de maïs ainsi que la concentration moyenne retrouvée, basé sur 1117 échantillons (Weaver et al. 2021)

Groupes de mycotoxines	Échantillons contaminés		Concentration moyenne (µg/kg) (± écart-type)
	Nombre	%	
<i>Roquefortine C</i>	20	1,8	9,2 (21)
<i>Patuline</i>	7	0,6	422 (286)

Ce tableau montre donc que ces mycotoxines ne sont retrouvées que rarement dans l'ensilage de maïs. Cependant, au-delà du risque mycotoxique, le développement de moisissures dans un ensilage va aussi en altérer les qualités organoleptiques et nutritionnelles, ce qui peut impacter très directement la production laitière.

c. Levures

Les levures ne sont pas à proprement parler des dangers car elles ne sont pas toxiques lors d'ingestion. Cependant, elles peuvent avoir un impact négatif direct sur la consommation d'ensilage en étant responsables d'un échauffement, d'une diminution d'appétence du fourrage et également d'une baisse de sa valeur alimentaire. Par ailleurs, leur présence en grande quantité dans l'environnement des animaux peut aussi avoir des effets indirects puisque ce sont des microorganismes qui peuvent être responsables de mammites, essentiellement subcliniques. La contamination de la mamelle est généralement d'origine ascendante (hygiène de traite), mais l'ensilage peut être une source indirecte de contamination croisée du matériel.

Données microbiologiques générales

Les levures sont des eucaryotes aérobies stricts ou aéro-anaérobies, elles peuvent être classées selon plusieurs critères et notamment leur capacité à utiliser différents substrats pour se développer : sucres ou acide lactique. Celles qui consomment du sucre sont dominantes lors de la phase aérobie au début de la confection de l'ensilage et lors de la phase anaérobie pendant le stockage. Au contraire, les levures consommatrices d'acide apparaissent généralement lors de l'ouverture du silo et de la réoxygénation de ce dernier. De ce fait, lors de l'oxygénation du silo, les levures reprennent leur activité respiratoire : elles consomment de l'acide lactique ce qui engendre une augmentation de pH et de température de l'ensilage.

Pour les levures fermentescibles anaérobies, on retrouve les genres *Saccharomyces* ou *Torulopsis* (Mahanna, Pioneer 2018). Elles utilisent les sucres résiduels présents lors du stockage et résistent à des pH acides jusqu'à 2,4. En milieu anaérobie, les levures continuent leurs fermentations : elles produisent de la chaleur, du dioxyde de carbone ou de l'éthanol. Cela leur permet de continuer à produire de l'énergie et ainsi continuer à se multiplier même lorsque la teneur en oxygène est minime. La forte compétition avec les entérobactéries pour la consommation de l'acide, fait que ces levures ne se développent que rarement (Galtier et al. 2006).

Pour les levures fermentescibles qui sont actives lors de la reprise de l'ensilage, on retrouve les genres *Candida* et *Hansula* (Mahanna, Pioneer 2018). Elles utilisent l'acide lactique et se multiplient en conditions aérobies lorsque le pH est généralement plus élevé, au-dessus de 4 (Galtier et al. 2006). Elles vont également produire de l'acide acétique et de l'éthanol, mais lorsque la température augmente, elles produisent aussi des composés aromatiques.

Principales sources de contamination

Les levures sont des épiphytes naturels, elles sont donc présentes dans le champ directement sur les plants de maïs et se retrouvent dans son ensilage lors de la récolte. Le maïs est un très bon substrat pour les levures puisque ces dernières affectionnent particulièrement les milieux riches en amidon et sucres solubles.

Impact sur la santé animale

Les levures les plus retrouvées ayant un impact sur la santé animale appartiennent au genre *Candida*. La production de différents alcools diminue d'une part l'appétence du fourrage, mais est également toxique pour le foie. De plus, en quantité importante, il semblerait que le genre *Candida* soit à l'origine de troubles de la reproduction avec une baisse de fécondité dus au développement de métrites et d'endométrites (Roy 2013).

Impact sur la santé humaine

Les levures représentent un danger pour la santé humaine principalement lors de la manipulation de l'ensilage contaminé. Ces levures provoquent des lésions au niveau de la peau ou des muqueuses (candidose). Néanmoins, en général le risque reste faible sauf en cas d'immunodéficience ou d'autres facteurs de vulnérabilité (Institut Pasteur 2021).

Les microorganismes ne sont pas les seuls dangers susceptibles de contaminer l'ensilage au moment de sa préparation et/ou de son stockage. Plusieurs adventices peuvent être ensilées lors de la récolte et rendre l'ensilage dangereux pour les animaux.

2.2 Plantes toxiques

Les parcelles de maïs sont sujettes, comme toutes les autres cultures, à la présence d'adventices. Or, ces dernières, lorsqu'elles sont présentes en grande quantité et non éliminées, peuvent se retrouver ensilées au moment de la récolte. Elles peuvent alors parfois être néfastes pour la santé animale ou humaine. Parmi les plus fréquentes, on retrouve la morelle noire, l'amarante, la mercuriale, le datura et le chénopode blanc (GDS Mayenne 2020; Lamy Grandidier 2021; Arvalis 2015; Dupuy, Ducourtieux, Lestrade 2023; Bélanger 2020).

a. La morelle noire

Description botanique

La morelle noire, *Solanum nigrum* L., est une plante herbacée de la famille des *Solanaceae*. Sa morphologie est présentée sur la figure 12. Elle est riche en glyco-alcaloïdes comme la solanine. Elle contamine fréquemment les parcelles de maïs fourrage. Son milieu de vie étant tempéré et chaud, elle est abondante en Europe, en Afrique du Sud et en Amérique latine. Sa présence est aussi liée au fait qu'elle est devenue résistante à certains herbicides et notamment l'atrazine ou la simazine (ANSES 2016). De plus, l'épandage de fumier favorise sa croissance.

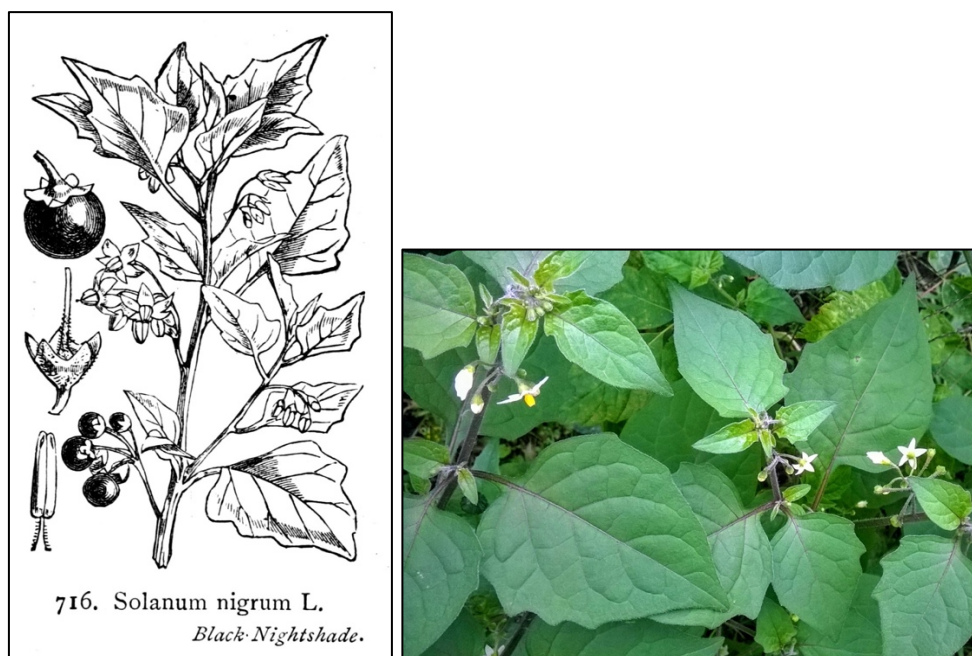


Figure 12 - Morelle noire - *Solanum nigrum* L. (Boisse 2019; Stueber 2007a)

Toxicité

Les parties de la plante contenant le plus de toxines sont les fruits verts et les feuilles. Sa toxicité est conservée après dessiccation. Les doses toxiques sont mal connues, mais les bovins s'intoxiquent généralement en consommant de l'ensilage contenant plus de 10-15% de morelle sur plusieurs jours (ANSES 2016). Les troubles graves apparaissent à partir de 3 à 25 g de solanine pour 100 kg de fourrage (Bruneton 2001).

Modalités d'intoxication

Les intoxications concernent principalement les bovins, les porcins et les volailles. Elle est ingérée principalement sèche ou sous forme d'ensilage, mais rarement fraîche puisque son odeur dissuade les animaux de la consommer.

Signes cliniques

Lors de sa consommation par les ruminants, la solanine agit sur le système nerveux, entraînant une tachypnée et une tachycardie ainsi qu'une hémolyse. Elle agit également sur le système digestif entraînant des troubles intestinaux sévères et une prostration.

Les risques liés aux intoxications des bovins par la morelle noire sont réels, mais restent néanmoins très peu documentés dans la bibliographie.

b. L'amarante

Description botanique

L'amarante est une plante herbacée appartenant à la famille des *Amarantaceae*. La plus importante quand on parle d'intoxication est *Amarantus retroflexus* L. aussi appelée amarante rouge ou réfléchie. Elle est présentée sur la figure 13. On la retrouve dans toute la France et notamment dans le sud du pays puisqu'elle résiste bien à la chaleur. Elle apparaît de manière très abondante dans certaines cultures fourragères comme le maïs et le sorgho. En effet, de par leurs morphologies, les graines, petites et légères, se disséminent facilement. De plus, l'amarante est devenue avec le temps assez résistante aux herbicides et notamment à la triazine, ce qui en fait un fléau pour les cultures de maïs (Costea, Weaver, Tardif 2004).

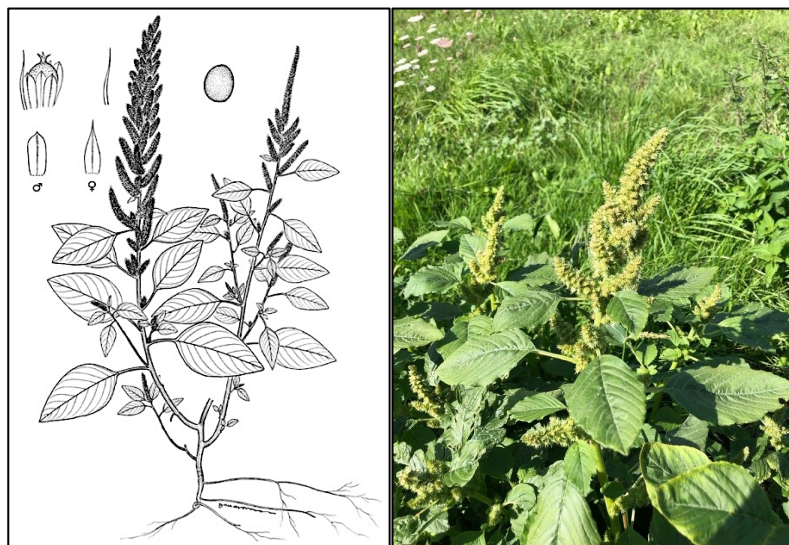


Figure 13 - Amarante réfléchie - *Amaranthus retroflexus* L. (Wiete 2019; Pinto, Orsini 2010)

Toxicité

Plusieurs composés contenus dans l'amarante sont toxiques et notamment les oxalates et les nitrates. On sait que l'accumulation d'oxalates peut atteindre 30% de son poids sec (CISMeF 2013). On les retrouve majoritairement dans les feuilles. La quantité maximale d'oxalates tolérée par voie orale par les ruminants est comprise entre 0,1 et 0,5 g/kg de poids vif (Bruneton 2001). Une partie de la flore ruminale des bovins est capable de dégrader les sels d'oxalate, ce qui fait que la dose toxique est assez variable en fonction des animaux. De plus, l'amarante à racine rouge peut accumuler des nitrates à des concentrations toxiques, principalement dans la tige. On peut en retrouver des quantités allant de 0,2 à 1,5% de la matière sèche, alors que la dose létale pour une vache est de 1g de nitrates par kilo de poids vif par voie orale (Davison et al. 1964).

Au niveau de l'inflorescence on peut retrouver les deux toxiques en proportion importante.

Modalités d'intoxication

Toute la plante est toxique et en particulier les feuilles et les fleurs pendant la période de floraison. Il est rare que les animaux la consomment fraîche, sauf en période de sécheresse. Elle est plutôt ingérée lorsqu'elle contamine l'ensilage ou les fourrages secs où elle conserve toute sa toxicité, même après dessiccation.

Signes cliniques

Les symptômes observés chez les ruminants sont liés aux fortes teneurs en oxalates et nitrates. Si les animaux consomment pendant plusieurs jours de l'amarante, ils présentent un abattement, une dyspnée (cyanose liée à la méthémoglobinisation) et des douleurs abdominales. En cas d'intoxication sévère, une toxicité rénale se développe avec un syndrome néphrotique : urémie et créatinémie très élevées. De plus, des symptômes nerveux peuvent s'ajouter : ataxie, convulsion, coma voire la mort. Pour finir, une hypocalcémie peut apparaître, du fait de la chélation du calcium liée aux oxalates.

c. La Mercuriale

Description botanique

La mercuriale annuelle, *Mercurialis annua* L., est l'espèce la plus présente dans les champs de maïs. C'est une plante herbacée annuelle appartenant à la famille des *Euphorbiaceae* (figure 14). La mercuriale est une plante qu'on retrouve fréquemment en France sur les parcelles ou dans les jardins. Elle se développe facilement même dans des milieux très secs et peut donc se développer en période de sécheresse.

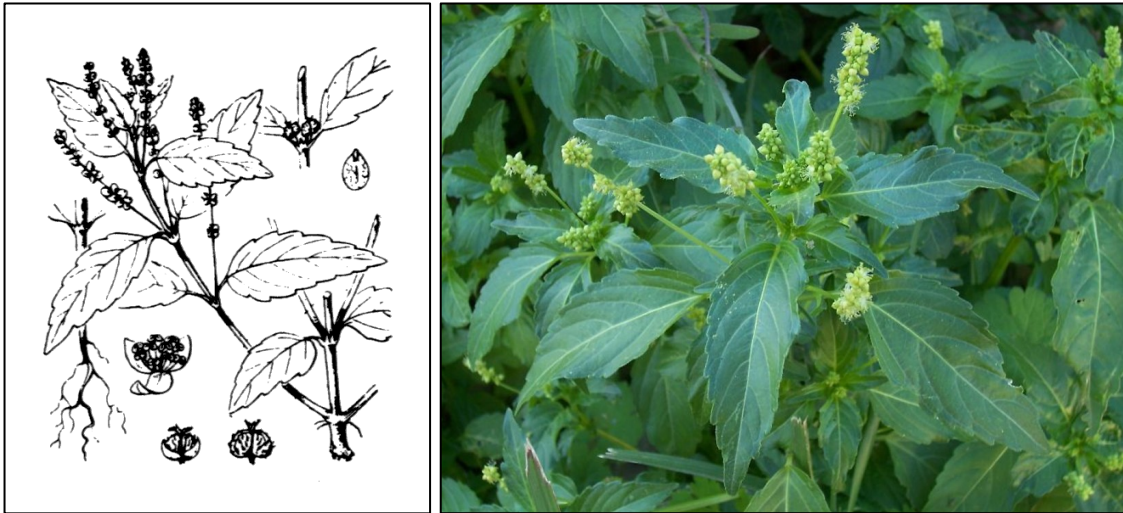


Figure 14 - Mercuriale annuelle - *Mercurialis annua* L. (Dante 2017; Milcent 2011)

Toxicité

Le principe actif à l'origine des intoxications n'est pas clairement identifié. La plante contient plusieurs molécules actives : la triméthylamine, les saponosides et l'hermidine qui est chromogène. On considère que des doses de 15 à 20 kg de plante fraîche sont mortelles pour un bovin (Boussin 2019).

Modalités d'intoxication

Toute la plante est toxique, également lorsqu'elle est sèche. Généralement, la plante fraîche est peu appétente, il y a donc plus de risques lors de la consommation de fourrages contaminés comme l'ensilage. On remarque un pic de toxicité lors de la maturation des fruits en fin d'été puisque les graines concentrent les molécules toxiques.

Signes cliniques

Lors de la consommation de mercuriale par les ruminants, les premiers signes d'intoxication sont de l'abattement, de l'anorexie, des troubles gastro-intestinaux avec coliques ainsi qu'une diarrhée. Suite à cela, soit on observe une guérison spontanée si l'aliment est retiré

de la consommation, soit l'évolution clinique se poursuit par une dysurie et une urine qui prend une couleur rouge ou brune (hémoglobine) avec une anémie pouvant entraîner la mort.

d. Le *Datura*

Description botanique

Le *datura* commun ou *Datura stramonium* L. est une plante annuelle de la famille des *Solanaceae* (figure 15). Elle se développe dans des climats tempérés à plutôt chauds, ce qui fait que le climat européen lui convient parfaitement. C'est une adventice commune dans les zones non cultivées, mais également dans les parcelles de maïs puisqu'elle est devenue résistante à certains herbicides et qu'elle affectionne particulièrement les cultures avec apports azotés comme les champs de maïs. Cette plante se multiplie de manière assez importante puisque que, dans un fruit, on peut retrouver 600 graines en moyenne.

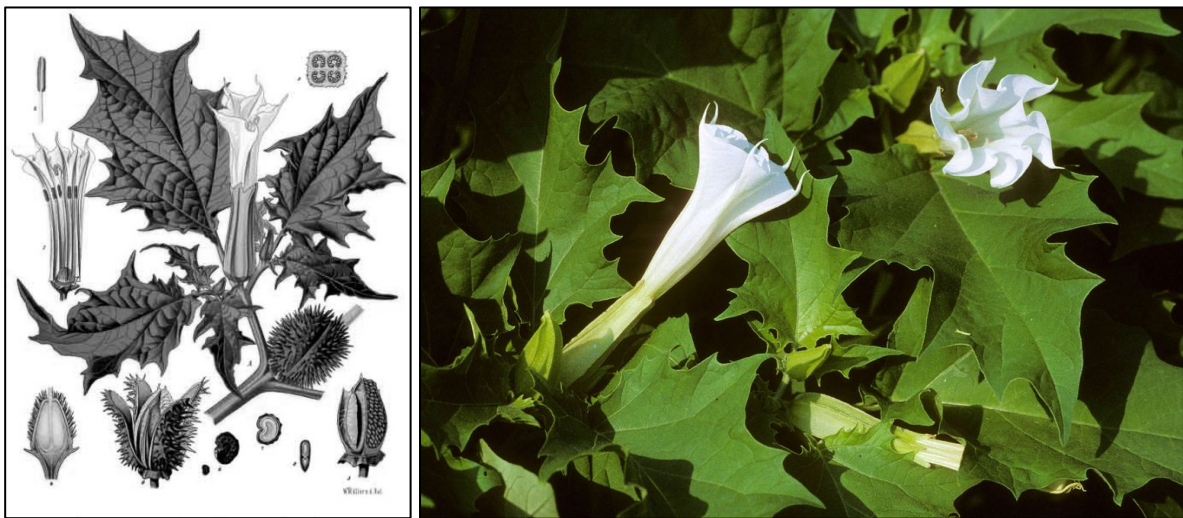


Figure 15 - *Datura stramoine* - *Datura stramonium* L. (Bornand 2018; Köhler 1887)

Toxicité

La toxicité du *datura* est liée à la présence d'alcaloïdes parasympholytique : atropine, hyoscyamine et scopolamine. La dose toxique pour les bovins est très faible : 250 à 500g de feuilles sont toxiques et on peut observer une mortalité dès lors que la contamination est supérieure à 0,03% à 0,09% du poids vif de l'animal (Mechekour 2023).

Modalités d'intoxication

On retrouve les principes actifs toxiques dans toute la plante, mais avec une concentration supérieure dans les graines et les tiges. Le datura est rarement consommé frais, son odeur étant dissuasive. Néanmoins, il contamine facilement les fourrages et son incorporation à l'ensilage de maïs lors de la récolte est fréquente.

Signes cliniques

L'atropine et la scopolamine, deux molécules retrouvées dans le datura, sont des agents anticholinergiques. De ce fait, lors de contaminations, on observera une tachycardie, une vasodilatation puis des troubles centraux : crises d'hyperexcitabilité et de convulsions. L'étape finale de l'intoxication est le coma puis la mort de l'animal.

e. Le Chénopode blanc

Description botanique

Le chénopode blanc ou *Chenopodium album* L. est une plante annuelle de la famille des *Amaranthaceae*. Il est représenté sur la figure 16. Cette plante est mésophile, elle se développe lorsque les températures sont modérées (15-45°C) ce qui fait qu'on le retrouve sur tout le territoire. De plus, elle est nitrophile et s'acclimate donc bien sur les parcelles de maïs.



Figure 16 - Chénopode blanc - *Chenopodium album* L. (Bolomier 1999; Stueber 2007b)

Toxicité

Le chénopode peut accumuler des nitrates et des oxalates, ce qui peut le rendre mortel pour le bétail en cas de consommation importante. Néanmoins, la dose toxique n'est pas connue.

Modalités d'intoxication

Toute la plante est toxique et elle conserve sa toxicité même après dessiccation, ce qui en fait donc un contaminant important dans les fourrages secs ou humides.

Signes cliniques

Les symptômes liés à une intoxication par le chénopode blanc sont semblables à ceux liés à la consommation d'amarante puisque les composés toxiques sont les mêmes : oxalates et nitrates. On observe donc généralement un syndrome néphrotique, des signes de coliques, un risque d'hypocalcémie lié à la chélation du calcium et pour finir, possiblement, des troubles respiratoires (cyanose liée à la méthémoglobinisation) et nerveux.

Comme nous venons de le voir, un certain nombre de plantes toxiques peuvent contaminer les ensilages et être responsables d'intoxication graves, voire mortelles chez les animaux en cas de forte consommation. L'incorporation de ces plantes dans l'ensilage empêche les animaux de réaliser un tri naturel de ces espèces toxiques rarement ingérées fraîches. Pour terminer l'analyse des dangers susceptibles d'être rencontrés dans les ensilages, nous allons maintenant aborder les dangers chimiques possibles.

2.3 Dangers chimiques

Les risques chimiques sont étroitement liés à la présence dans la matière première initiale, le maïs, de certains contaminants comme les mycotoxines ou les pesticides. Ils peuvent aussi résulter d'une mauvaise fermentation de l'ensilage, entraînant l'accumulation de composés toxiques pour les animaux : nitrates, nitrites, amines biogènes, ammoniac...

a. Présence de mycotoxines dans le maïs à la récolte

Comme vu précédemment, certaines moisissures peuvent se développer pendant le stockage de l'ensilage, si les conditions de préparation et d'utilisation ne sont pas parfaitement maîtrisées. D'autres peuvent aussi contaminer le maïs au champ, avant la récolte, et y produire des mycotoxines. Ces espèces fongiques ne seront pas forcément ensuite capable de continuer à se développer dans l'ensilage, mais les toxines produites, elles, résistent aux conditions physico-chimiques de stockage de cet aliment. Les principales moisissures qui se développent au champ appartiennent aux genres *Fusarium* et *Aspergillus* (Weaver et al. 2021; Ogunade et al. 2018; Driehuis et al. 2018). Les mycotoxines qu'elles produisent sont, pour les plus importantes, les trichotécènes (en particulier le déoxynivalénol), la zéaralénone, les fumonisines pour les *Fusarium* et l'aflatoxine ou l'ochratoxine pour les *Aspergillus*. Comme pour les mycotoxines de stockage, la production de ces métabolites toxiques est étroitement liée au développement fongique, mais, toutes les souches n'ayant pas le même potentiel toxigène, il n'existe pas de lien direct et systématique entre niveau d'attaque fongique des plantes au champ et niveau de contamination mycotoxique à la récolte. C'est pour cette raison que les recommandations en vigueur concernant l'alimentation animale concernent les toxines et non les organismes producteurs (moisissures).

On peut enfin souligner que, même s'il existe des recommandations (UE 2016/1319) et directives européennes (2003/100/CE) concernant les seuils maximaux pour certaines de ces molécules (Règlement Européen 2016; 2003), l'ensilage étant souvent produit et consommé sur place, au sein de l'exploitation, il n'est pas toujours contrôlé quant à son niveau de contamination mycotoxique avant distribution aux animaux. Enfin, comme nous le verrons, les ruminants sont quand même globalement assez résistants à certaines de ces toxines, en particulier celles des *Fusarium*, contrairement à ce qui a été évoqué précédemment pour les toxines pouvant être produite pendant le stockage. Par contre, une de ces toxines, l'aflatoxine B1, pose un problème majeur de transfert possible dans le lait et de toxicité résiduelle chez l'Homme.

❖ *Mycotoxines produites par le genre Fusarium*

Données microbiologiques

Les espèces fongiques du genre *Fusarium* prolifèrent pendant la croissance et la maturation des plantes au champ. Il s'agit d'espèces hygrophiles nécessitant une humidité élevée de plus de 70% et des températures fluctuantes. Des journées chaudes et des nuits froides

sont idéales. Le genre *Fusarium* peut synthétiser plus de vingt mycotoxines différentes (Paragon et al. 2004), les plus fréquentes dans le maïs sont les trichothécènes du groupe A (toxines T-2 et HT-2), le déoxynivalénol (trichothécène du groupe B) (DON), la zéaralénone (ZEN) et les fumonisines (FB). Au sein de l'ensilage, les espèces du genre *Fusarium* incorporées lors de la récolte, ne toléreront pas le pH acide ni l'anaérobiose. Elles ne se développeront donc pas et, pour la plupart, disparaîtront en cours de stockage. Par contre, les toxines, elles sont stables.

Trichothécènes du groupe A

Les toxines T-2 et HT-2 sont principalement produites par *Fusarium sporotrichioides* et *Fusarium poae* (Streit et al. 2012). Ces espèces se développent surtout lors d'un passage à basse température ou un niveau d'humidité élevé. C'est pourquoi on les retrouve dans les cultures, mais également pendant les récoltes ou le stockage en conditions humides.

Déoxynivalénol (DON)

Le déoxynivalénol fait partie de la famille des trichothécènes du groupe B. Il est produit par *Fusarium graminearum* et *Fusarium culmorum* (Streit et al. 2012). Des périodes froides et humides suivies d'une courte période sèche favorisent leur développement (Diekman, Green 1992). Plusieurs études ont montré que le DON est l'une des mycotoxines les plus fréquemment détectées dans les ensilages avec des concentrations pouvant être élevées (Ogunade et al. 2018).

Zéaralénone

C'est une mycotoxine produite par plusieurs espèces de moisissures du genre *Fusarium*, essentiellement *F. graminearum* et *F. culmorum* et, dans une moindre mesure par *F. equiseti*. Ces espèces se développent au champ. L'exposition aux intempéries entraînant une humidité élevée ainsi qu'une alternance de températures basses et modérées favorisent la production de zéaralénone dans le maïs (Galtier et al. 2006).

Fumonisines

Cette mycotoxine est produite par *Fusarium verticillioides* majoritairement, mais peut également l'être par *Fusarium proliferatum*, *Fusarium anthophilum* et *Fusarium nygamai*. Il existe plus de 28 formes de fumonisines connues regroupées en catégories A, B, C et P (Yazar, Omurtag 2008). Parmi les plus toxiques, on trouve la fumonisine B1. Sa présence est associée à un climat plutôt chaud et humide, mais aussi aux insectes ravageurs tels que la pyrale qui

induisent des lésions sur les tiges et épis de maïs, ce qui favorise l'infection fongique et augmente le risque de contamination des plantes par ces mycotoxines.

❖ *Mycotoxines produites par le genre Aspergillus*

Données microbiologiques

Les moisissures du genre *Aspergillus* sont généralement considérées comme des contaminants de stockage. Cependant, certaines espèces peuvent aussi se développer au champ avant la récolte. Il ne s'agit pas d'espèces phytopathogènes et elles vont agir comme des pathogènes opportunistes, profitant de conditions favorables pour coloniser les grains. Ainsi, *Aspergillus flavus* peut infecter les cultures si les conditions sont favorables : température élevée car il s'agit d'une espèce thermopréférante (contamination plus fréquente dans les pays chauds), humidité élevée de plus de 80% ou en cas de stress hydrique (Storm et al. 2008). Les lésions des grains induites par les insectes peuvent également favoriser ce développement en facilitant l'accès aux nutriments présents dans les grains (glucides essentiellement).

Aflatoxines

Ces toxines sont produites majoritairement par *Aspergillus flavus* dans le maïs même si plusieurs espèces d'*Aspergillus* sont connues comme étant aflatoxinogènes (Galtier et al. 2006). Les conditions les plus favorables à leur biosynthèse sont présentées dans le tableau 12. Les aflatoxines sont des composés mutagènes et cancérigènes : l'aflatoxine B1 (AFB1) et M1 (AFM1) sont considérées comme les plus puissants cancérigènes naturels connus (Squire 1981). Dans la plupart des études disponibles, les concentrations observées dans les ensilages bien conservés sont relativement faibles et liées à la présence initiale de la toxine dans les grains avant ensilage. Cependant, il n'existe pas de données précises sur la capacité d'*A.flavus* à se développer pendant le stockage de l'ensilage, en particulier en cas de défaut de fabrication. Compte tenu de l'importance croissante de cette toxine en Europe, en lien avec les changements climatiques (voir plus loin) et de son importance en santé publique, il semble important de clarifier ce point.

Tableau 12 - Caractéristiques de croissance et de toxinogénèse d'*Aspergillus flavus* (ANSES 2012)

Croissance	Minimal	Optimal	Maximal
Température (°C)	10-12	33	43-48
pH	2,1	7,5	11,2
A _w (Activité hydrique)	0,78-0,84	0,97	/

Toxinogénèse	Minimal	Optimal	Maximal
Température (°C)	13	16-31	37
A_w (Activité hydrique)	0,82	0,95-0,99	/

Ochratoxines

Les ochratoxines sont des métabolites secondaires produits par plusieurs espèces d'*Aspergillus* : *Aspergillus ochraceus*, *Aspergillus niger* et *Aspergillus carbonarius*. Une espèce de *Penicillium* peut également la produire : *Penicillium verrucosum*. Dans cette famille de toxines, on trouve l'ochratoxine A (OTA), considérée comme la plus toxique. Cette mycotoxine reste de faible incidence dans le maïs à la récolte et dans les ensilages, en tout cas à l'heure actuelle en Europe. Cette toxine est plus souvent rencontrée dans les céréales stockées sèches car les espèces productrices sont xérophiles et peuvent tirer profit de tout mauvais séchage ou réhumidification des grains pendant le stockage.

Impact sur la santé animale

Comme évoqué précédemment, chez les ruminants, la présence de la microflore ruminale permet une métabolisation de certaines mycotoxines en composés moins ou pas toxiques. Cette particularité du microbiote ruminal fait que les bovins sont globalement moins sensibles aux mycotoxines que les monogastriques, en particulier aux toxines de *Fusarium*.

Par exemple, le déoxynivalénol et l'ochratoxine A sont transformés en métabolites non toxiques dans le rumen. Pour ce qui est de la zéaralénone, sa métabolisation entraîne la formation de composés plus toxiques, mais moins bien absorbés dans l'intestin, ce qui, là encore contribue à protéger la santé des animaux. Ce constat explique que les seuils tolérables dans les aliments pour bovins sont généralement plus élevés que pour les autres espèces (en particulier les porcs, très sensibles à la plupart des mycotoxines). On peut quand même souligner que la capacité de métabolisation peut varier d'un individu à l'autre et être impactée par l'environnement et les conditions d'élevage. En effet, il a été démontré que, pour le DON, ce sont essentiellement des protozoaires qui sont responsables de sa métabolisation ruminale. Or, la présence de ces microorganismes peut être fortement influencée par l'alimentation. Ainsi, l'acidose ruminale chronique souvent observée chez les vaches laitières hautes productrices, en lien avec leur alimentation très riche en énergie, peut diminuer leur capacité à détoxifier le DON.

Les ruminants ne sont pas non plus résistants à toutes les mycotoxines, comme nous l'avons évoqué pour les toxines pouvant apparaître au cours du stockage de l'ensilage. Ainsi, les bovins sont relativement sensibles aux toxines T-2 et HT-2 qui peuvent entraîner des troubles variés, en fonction de la dose et de la durée d'exposition (troubles digestifs, diarrhées, hémorragies intestinales...).

Une autre toxine d'intérêt majeur est l'aflatoxine B1 (Weaver et al. 2021). Aux concentrations retrouvées dans les aliments pour bovin et en particulier dans l'ensilage, cette toxine n'est que rarement impliquée dans l'apparition de troubles chez les bovins (toxicité essentiellement hépatique). Cependant, après ingestion, elle est métabolisée en un composé toujours toxique et dont la structure (figure 17) permet l'excrétion lactée : l'aflatoxine M1. La proportion d'AFB1 excrétée sous forme d'AFM1 peut atteindre 5-10% de la quantité initiale d'AFB1. Par conséquent l'exposition du bétail laitier à cette toxine doit être limitée au maximum et fait l'objet d'un seuil réglementaire très bas selon la directive 2003/100/CE (Règlement Européen 2003).

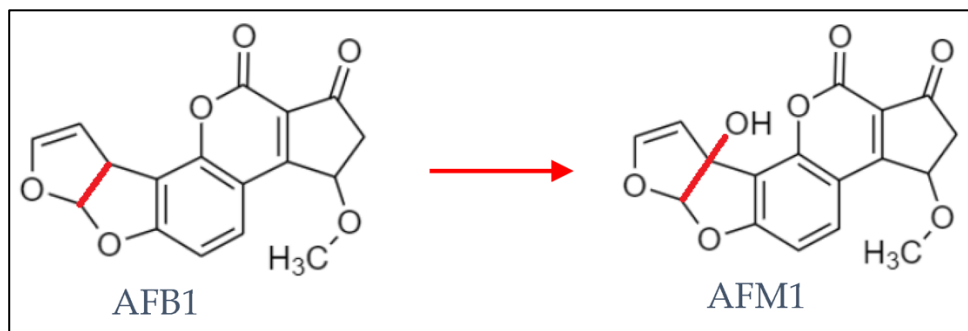


Figure 17 – Métabolisation de l'aflatoxine B1 en aflatoxine M1 (Vaz et al. 2020)

Impact sur la santé humaine

A l'exception de l'Aflatoxine et de son métabolite (AFM1) excrété dans le lait, il ne semble pas y avoir de risque de transfert des mycotoxines du champ dans le lait. L'exposition humaine à ces composés est essentiellement liée à la consommation directe de céréales.

L'AFM1, elle, est classée comme potentiellement cancérigène chez l'homme. Sa toxicité est essentiellement hépatique et, de ce fait, elle est particulièrement dangereuse pour les enfants. Ceci explique qu'il existe des seuils maximaux dans les produits laitiers et que les valeurs pour l'alimentation infantile soient particulièrement basses (Règlement Européen 2023). Cependant, comme évoqué précédemment, les matières premières utilisées pour fabriquer les ensilages étant en général auto-produites sur les exploitations, elles ne font

généralement pas l'objet de contrôles initiaux (pas de commercialisation directe), ce qui peut entraîner une exposition des animaux à ces contaminants.

❖ *Bilan sur les moisissures produites au champ*

Le tableau 13 présente les moisissures et les mycotoxines qui peuvent contaminer l'ensilage de maïs au champ.

Tableau 13 - Principales caractéristiques des moisissures pouvant contaminer l'ensilage de maïs au champ

Moisissure	Mycotoxine produite	Seuil maximum acceptable	Impact sur la santé		Références
			Animale	Humaine	
<i>Fusarium</i>	Trichotécènes	Non stipulé	Immunosuppresseur Infertilité	Troubles hématologiques	(Ogunade et al. 2018) (Driehuis et al. 2018)
	Déoxynivalénol	5mg/kg MS	Troubles gastro-intestinaux	Troubles gastro-intestinaux	
	Zéaralénone	0,52mg/kg MS	Infertilité	/	
	Fumonisines	50mg/kg MS	Légers problèmes hépatiques	Possiblement cancérigène	
<i>Aspergillus</i>	Aflatoxines	5 µg/kg MS	Diminution production/qualité laitière Maladie hépatique	Cancérigène hépatique avéré	
	Ochratoxines	Non stipulé	/	Toxicité rénale probable	

Parmi ces mycotoxines, certaines sont plus fréquemment présentes dans l'ensilage de maïs en plus ou moins grande quantité, c'est ce qu'on retrouve dans le tableau 14.

Tableau 14 – Fréquence des différentes mycotoxines présentes dans l'ensilage de maïs ainsi que la concentration moyenne retrouvée basé sur 1117 échantillons (Weaver et al. 2021; Règlement Européen 2023; 2016; 2003)

Groupes de mycotoxines	Échantillons contaminés		Concentration moyenne (µg/kg) (± écart-type)
	Nombre	%	
<i>Aflatoxine B1</i>	88	7,9	9,5 (13,0)
<i>Aflatoxines totales</i>	237	21,2	18,0 (37)
<i>Ochratoxines</i>	24	2,1	9,7 (15,9)
<i>Trichothécènes Type B (dont DON)</i>	1000	89,5	2169 (2900)

<i>Trichothécènes Type A</i>	323	28,9	181 (459)
<i>Fumonisines</i>	752	67,3	2227 (5100)
<i>Zéaralénonnes</i>	199	17,8	560 (683)

Ce tableau montre que les trichothécènes de type B dont le déoxynivalénol sont les plus souvent isolés dans l'ensilage de maïs, suivis par les fumonisines.

b. Les amines biogènes

Les amines biogènes sont des molécules produites par décarboxylation des acides aminés par plusieurs bactéries lactiques comme *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Enterococcus*, *Pediococcus* (Križek, Kalač, Peterka 1993) et de nombreux autres genres bactériens potentiellement présents dans l'ensilage comme *Clostridium*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Escherichia* ou *Pseudomonas*.

Les principales amines biogènes proviennent de trois acides aminés essentiels : l'arginine formant la putrescine, la lysine formant la cadavérine et la tyrosine formant la tyramine. Leur production est une conséquence de la protéolyse bactérienne, ce qui entraîne une diminution de la valeur nutritionnelle de l'ensilage par réduction de sa teneur protéique, mais aussi une réduction de son appétence (Driehuis et al. 2018). Elles ont donc un impact direct sur la consommation alimentaire et la santé animale.

Pour limiter ces risques, l'acidification directe avec de l'acide formique ou l'inoculation de bactéries lactiques sont possibles. Cela va inhiber le développement des bactéries protéolytiques (Križek, Kalač, Peterka 1993).

c. L'azote sous toutes ses formes

Le nitrate (NO₃-) a un rôle important dans la culture végétale : il permet la croissance du tissu végétal et est également une source de macronutriments. Au début du printemps, suite à l'épandage azoté sur les parcelles, sa concentration est souvent élevée dans la plante récoltée. De plus, lors de phénomène de sécheresse, on observe une augmentation de la concentration en nitrate dans les cultures liée à la réduction de la photosynthèse (Foyer et al. 1998).

Parfois les concentrations en NO_3^- dans le fourrage stocké dépassent 1700 mg/kg de MS. A ces teneurs, ils deviennent toxiques pour le bétail (Adams et al. 2019). Il est donc important d'équilibrer la ration et de ne pas distribuer uniquement de l'ensilage contaminé.

Néanmoins, la teneur en nitrates est généralement limitée par le processus de fermentation. En effet, il est dégradé au début de la période d'ensilage par les entérobactéries et les bactéries lactiques formant ainsi de l'ammoniac (NH_3) et de l'oxyde nitreux (N_2O). Pour obtenir ce résultat, il y a une étape intermédiaire qui génère du dioxyde d'azote (NO_2) et de l'oxyde nitrique (NO) (Pahlow et al. 2003). Le dioxyde d'azote est important pour une bonne acidification du silo. Il est donc préférable qu'il ne soit pas totalement dégradé en nitrate. Au contraire, la présence d'oxyde nitrique est néfaste. Ce dernier est un gaz incolore qui s'oxyde en présence d'air, formant un gaz jaune à brun rougeâtre, irritant. L'oxyde nitrique et le dioxyde d'azote réagissent alors avec l'eau et forment des gaz nitreux et de l'acide nitrique pouvant engendrer des problèmes respiratoires chez les animaux et l'Homme.

d. Les pesticides

Le maïs est une culture qui nécessite peu de traitements phytosanitaires. Néanmoins, certains résidus de pesticides peuvent être retrouvés dans l'ensilage de maïs en fonction des pratiques culturales, du type de pesticide utilisé et des conditions de récoltes et conservation. L'essentiel des traitements du maïs concerne le désherbage pour limiter la compétition avec les adventices. En effet, en absence de désherbage, des études ont montré que le rendement peut être réduit de 51% (Bilodeau et al. 2020). Le désherbage précoce est le plus pratiqué, permettant de mieux maîtriser les adventices. Il peut être réalisé dès le semis. Les pesticides utilisés mentionnent sur leur étiquette un délai avant récolte (DAR) (Bayer 2018), c'est-à-dire la durée à respecter entre le traitement et la date de récolte prévisible pour ne pas être au-delà de la limite maximale de résidus (LMR). De ce fait, si les conditions d'usage sont respectées, que l'application des bonnes pratiques agricoles et la surveillance régulière de la parcelle sont faites, les risques pour la santé animale ou humaine en lien avec l'ensilage sont négligeables. De plus, la taille des plants de maïs empêche rapidement tout traitement mécanisé des parcelles. Cela réduit donc les risques d'un traitement proche de la date de récolte.

2.4 Conclusion partielle : les contaminants de l'ensilage de maïs

Différents micro-organismes indésirables peuvent contaminer voire se développer au sein des ensilages. De même, certains végétaux ou composés toxiques peuvent être incorporés au sein de ce dernier au moment de la récolte et de la fabrication. Ces contaminants ne sont pas toujours visibles et leur impact sur la santé animale ou la sécurité des produits animaux (lait) peuvent conduire à écarter de la consommation de tout un silo, ce qui est souvent très difficile pour les éleveurs, qui n'ont pas toujours de solution alternative d'alimentation de leur troupeau.

Pour éviter ces contaminations et leurs conséquences sanitaires et économiques, il est nécessaire de mettre en place des moyens de prévention et des contrôles réguliers. Dans la partie suivante de ce manuscrit, nous allons nous attacher à identifier ces mesures et points de contrôle, en utilisant une approche semblable à celle couramment utilisée dans les industries agroalimentaires pour maîtriser les dangers : la méthode HACCP.

– PARTIE 3 –

**3. MAÎTRISE DES RISQUES SANITAIRES EN SUIVANT LA MÉTHODE
HACCP**

Après avoir analysé les dangers susceptibles d’être présents dans l’ensilage de maïs, nous allons envisager les mesures de maîtrise pouvant être mises en place aux différentes étapes de préparation, stockage et utilisation de l’ensilage en nous inspirant de la méthode HACCP.

3.1 Rappel des principes de la méthode HACCP

La méthode HACCP est une méthode créée aux USA à la fin des années 60 par la NASA pour garantir la sécurité des aliments destinés aux vols spatiaux habités. Cette méthode s’est ensuite largement répandue dans les industries agro-alimentaires aux Etats-Unis puis dans le monde. Ce procédé est désormais identifié comme la référence à utiliser par les professionnels de l’alimentation pour garantir la sécurité des aliments qu’ils produisent. Elle fait partie intégrante de la réglementation européenne (paquet hygiène) et est un élément important du référentiel IFS (*International Featured Standard*) créé pour les entreprises fabriquant des produits commercialisés sous marque de distributeur. Le terme HACCP signifie *Hazard Analysis - Critical Control Points* que l’on peut traduire par « analyse des dangers – détermination des étapes clés de maîtrise ». Elle repose sur l’identification de tous les dangers pouvant survenir au cours de la fabrication d’un aliment, l’identification des sources possibles de ces dangers et l’application systématique de mesures préventives qui en permettent la maîtrise. Elle permet aussi d’identifier la nature des paramètres à contrôler, tout au long de la fabrication, pour garantir la sécurité du produit fini.

Chaque démarche HACCP est spécifique, adaptée à un processus de fabrication et doit donc être réévaluée lorsqu’une étape évolue dans la chaîne de production.

La méthode HACCP est régie par 7 principes (DGCCRF 2004) :

a. Analyser les dangers

- b. Identifier les points critiques**
- c. Établir des limites critiques** à ne pas dépasser
- d. Mettre en place une surveillance des points critiques**
- e. Mettre en œuvre des actions correctives**
- f. Vérifier l'efficacité** des actions correctives
- g. Mettre en place un système documentaire**

Nous allons maintenant détailler ces différents principes avant de les appliquer à l'ensilage de maïs.

a. Analyse des dangers

Le but de cette étape est d'identifier l'ensemble des dangers que l'on peut rencontrer au cours de la fabrication du produit et les hiérarchiser en fonction du risque qu'ils représentent (probabilité de voir se manifester leurs effets néfastes après ingestion de l'aliment). Une fois les dangers significatifs identifiés (ceux susceptibles d'avoir un effet néfaste si on ne les maîtrise pas), il faut identifier les causes pouvant entraîner leur apparition ou leur multiplication dans l'aliment afin d'y remédier en mettant en place des mesures préventives.

Pour identifier les causes d'apparition des dangers, on utilise classiquement la méthode dite des « 5M » dont le diagramme d'Ishikawa est représenté sur la figure 18. Cette méthode consiste à considérer 5 sources possibles d'apport ou d'augmentation du danger, à chaque étape de fabrication : le milieu, le matériel, la main d'œuvre, la matière première et la méthode.

- **Matière** : les matières premières utilisées pour la fabrication du produit final
- **Main-d'œuvre** : le personnel qui manipule les matières premières de l'aliment
- **Méthodes** : les processus de fabrication
- **Milieu** : les locaux
- **Matériel** : les ustensiles utilisés à chaque étape de fabrication

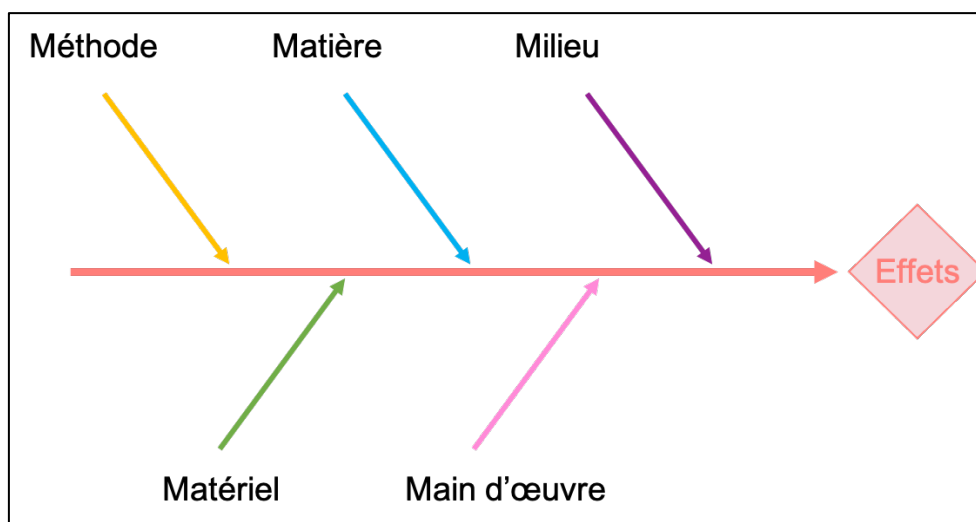


Figure 18 - Diagramme d'Ishikawa représentant la « méthode des 5M »

La démarche va donc consister, à chaque étape de fabrication et pour chaque danger significatif identifié, à envisager ces 5 sources possibles d'apport ou d'augmentation du danger (pour les dangers capables de se multiplier). A chaque fois qu'une source possible est identifiée, il faudra définir quelle(s) mesure(s) de maîtrise et bonnes pratiques d'hygiène il convient d'appliquer pour prévenir la contamination/multiplication du danger dans l'aliment.

b. Identification des points critiques de maîtrise (CCP)

Les CCP (étapes essentielles dans la maîtrise du danger considéré) sont des étapes pour lesquelles il sera possible de définir un paramètre de surveillance ainsi que ses limites critiques afin de maîtriser le danger. Ces étapes peuvent être identifiées à l'aide d'un arbre décisionnel. Il est important de noter qu'il n'existe pas d'arbre décisionnel officiel. Celui présenté sur la figure 19 est l'arbre de décision de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentaire et l'Agriculture) montré à Rome en 2023, issu du *Codex alimentarius*. Si cet arbre est facile à utiliser, il convient de souligner qu'il manque une question qui doit être posée lorsque l'arbre indique « cette étape est un CCP ». En effet, comme évoqué ci-dessus, un CCP est caractérisé par l'existence d'au moins un paramètre de surveillance associé au danger et de limites critiques associées pouvant être facilement contrôlées ou mesurées. Il conviendra donc de se demander, lorsque l'arbre indique un CCP s'il existe un ou des paramètres de surveillance pouvant être contrôlés facilement.

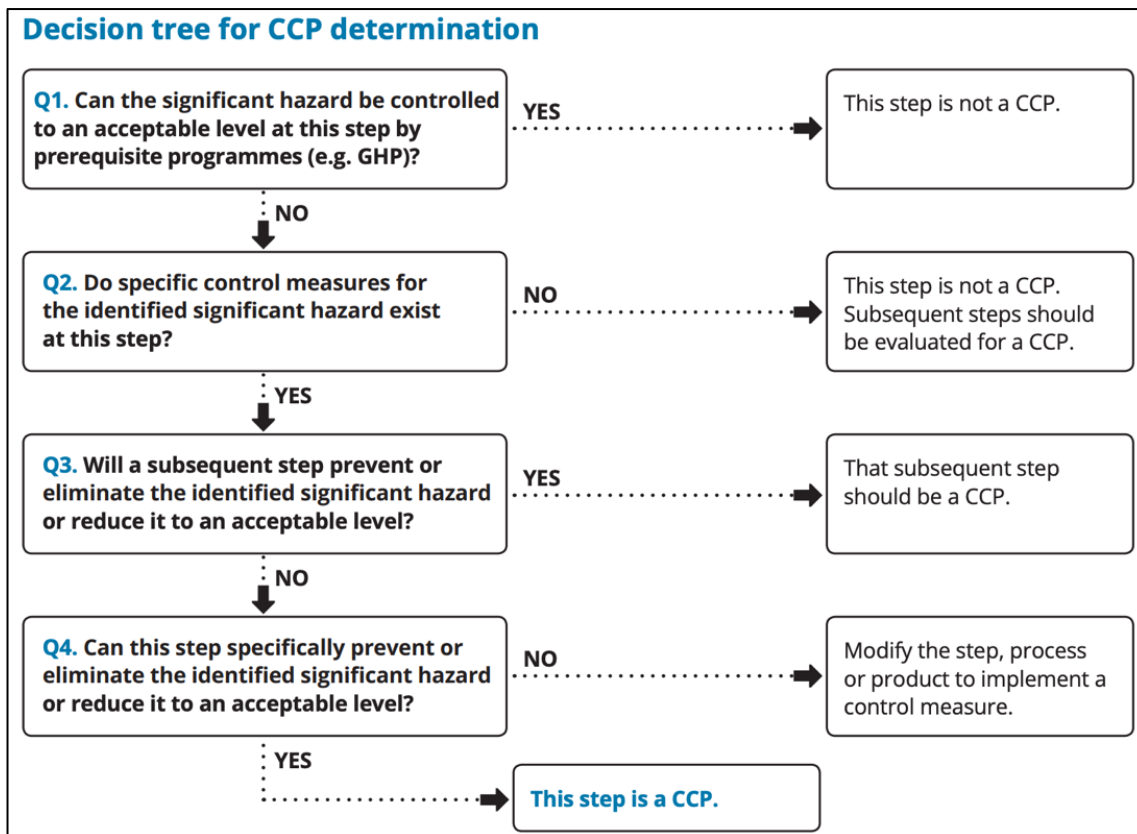


Figure 19 - Arbre décisionnel des points critiques pour la maîtrise (FAO 2023)

c. Limites critiques à ne pas dépasser

Les limites critiques sont à définir pour chaque paramètre de surveillance associé à un CCP. Elles servent à savoir ce qui est acceptable ou non. Les limites peuvent être, soit des valeurs numériques mesurées comme un pH, une température, une activité de l'eau, etc., soit des critères opérationnels impliquant, par exemple, un contrôle visuel par l'opérateur. Une fois ces limites déterminées, il faut établir des procédures afin de les contrôler. Cela peut passer par des fiches de suivi, des mesures régulières etc.

En cas de dépassement de la limite critique établie, il convient de mettre en œuvre des actions correctives, préalablement établies, et de suivre l'évolution de ces modifications. L'idéal est de tenir un registre pour assurer une traçabilité.

Nous allons maintenant essayer d'appliquer cette méthode à l'ensilage de maïs en se concentrant sur les principaux dangers associés à cet aliment et ainsi limiter les risques sanitaires et garantir son innocuité.

3.2 Adaptation de la méthode HACCP à l'ensilage de maïs

a. Analyse des dangers

Afin d'appliquer la démarche HACCP à la fabrication d'un ensilage de maïs, le diagramme de fabrication simplifié que nous allons utiliser pour ce produit est représenté sur la figure 20 ci-dessous.

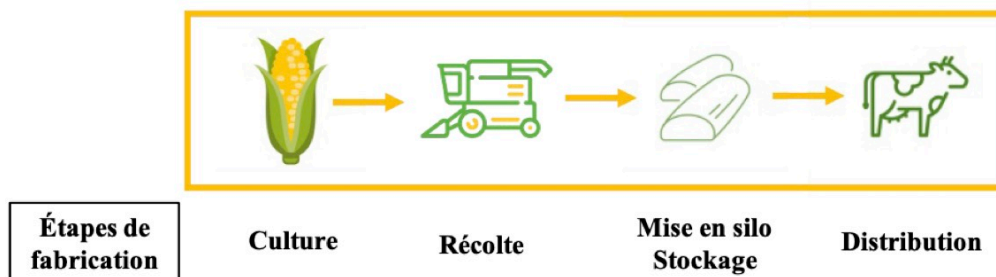


Figure 20 - Schéma simplifié des différentes étapes de fabrication d'un ensilage de maïs

La démarche HACCP doit être réalisée étape par étape et nous allons donc analyser les dangers susceptibles d'intervenir à chacune de ces étapes de fabrication, identifier les sources en utilisant la méthode des 5M et les mesures de maîtrise pouvant être mises en place. Chaque étape sera reprise dans le tableau 15 pour faciliter la lecture.

Tableau 15 - Démarche HACCP appliquée à l'ensilage de maïs

Étape	Danger	Modalité d'apparition	Cause	Mesure de maîtrise
Culture	Bactéries pathogènes	Contamination	Épandage	Délai suffisant entre l'épandage et la récolte
			Pâturage	Bonne gestion des parcelles (rotation)
			Bactéries épiphytes	Conservateurs
	Moisissures / Mycotoxines	Contamination	Attaque par des nuisibles (taupin, pyrale)	Lutte contre les nuisibles (insecticides, enrobage)
			Conditions climatiques favorables (humidité, chaleur)	/
	Plantes toxiques	Contamination	Conditions environnementales favorables	Herbicides Rotation des cultures

Étape	Danger	Modalité d'apparition	Cause	Mesure de maîtrise
Récolte	Bactéries pathogènes	Contamination	Incorporation de terre	Hauteur de coupe
	Moississures / Levures	Contamination	Incorporation de terre	Hauteur de coupe
			Matériel agricole de récolte	Nettoyage-désinfection
		Multiplication	Délai entre récolte et mise en silo trop long	Mise en silo rapide
	Plantes toxiques	Contamination	Récolte avec les plans de maïs	/
Mise en silo	Bactéries pathogènes	Contamination	Incorporation de matières organiques	Propreté du silo
			Incorporation de terre	Nettoyage-désinfection (Roues du tracteur)
		Multiplication	Délai trop long avant acidification	Conservateurs
	Moississures / Levures	Contamination	Incorporation de matières organiques	Propreté du silo
			Incorporation de terre	Nettoyage-désinfection (Roues du tracteur)
		Multiplication	Délai trop long avant anaérobiose	Conservateurs
			Défaut de tassement	Teneur en matière sèche Vitesse de tassement Épaisseur limitée des couches entre chaque tassement
			Teneur en matière sèche trop élevée	Ajuster le moment de récolte Conservateurs

Étape	Danger	Modalité d'apparition	Cause	Mesure de maîtrise
Stockage	Bactéries pathogènes	Contamination	Attaque du silo par des nuisibles (insectes, rongeurs)	Lutte contre les nuisibles
		Multiplication	Défaut d'acidification	Conservateurs Contrôle du pH
	Moisissures /Mycotoxines	Contamination	Attaque du silo par des nuisibles (insectes, rongeurs)	Lutte contre les nuisibles
		Multiplication	Défaut d'anaérobiose	Bâche en bon état Lutte contre les nuisibles
Distribution	Bactéries pathogènes	Contamination	Faune sauvage	Lutte contre les nuisibles
			Matériel agricole de distribution	Nettoyage-désinfection
	Multiplication	Avancée du front d'attaque insuffisant	Contrôler l'avancement du front d'attaque	
	Moisissures /Mycotoxines	Multiplication	Avancée du front d'attaque insuffisant	Contrôler l'avancement du front d'attaque

Pour la majorité des dangers évoqués, nous constatons qu'il existe des moyens de prévention pouvant être mis en place par les agriculteurs, la majeure partie d'entre-elles correspondant à la maîtrise parfaite de la technologie de fabrication de l'aliment.

Par contre, certaines sources de contamination, en particulier au champ, posent problème. Il s'agit de la présence de mycotoxines et de plantes toxiques dont la présence est en lien direct avec les conditions climatiques et leur évolution au cours du temps.

Même si le climat n'est pas contrôlable, il est possible de le prédire de façon de plus en plus précise. Grâce aux prévisions météorologiques, les agriculteurs peuvent déterminer la fenêtre idéale de récolte en se basant sur la variété cultivée et la météo prévue pour les jours de récolte, limitant ainsi le risque d'augmentation rapide de la contamination mycotoxique en péri-récolte, c'est-à-dire lorsque les conditions de température et d'humidité sont souvent optimales pour les espèces fongiques toxinogènes. Nous verrons dans la partie suivante, l'impact des changements climatiques sur la culture de maïs et son ensilage.

La gestion des ravageurs et adventices toxiques est aussi un véritable problème. Pour les gérer, il est indispensable d’agir de manière précoce car, ensuite, la taille des plants empêche toute action mécanisée. Les insecticides sont incorporés soit par enrobage des semences, soit avec des granulés répandus dès le semis ou, plus tard, lors de la levée. Pour les herbicides ils sont pulvérisés lors des phases de pré-levée avant la germination du maïs et des adventices, en post-levée lorsque le maïs est au stade 2-4 feuilles ou plus tard au stade 4-6 feuilles, ce qui dans tous les cas nécessite des produits très rémanents, et donc potentiellement très toxiques pour l’environnement. Avec la mise en place des plans Écophyto, la réduction de l’utilisation des produits phytosanitaires est au cœur des préoccupations. De ce fait, les agriculteurs doivent trouver des techniques alternatives : cela passe notamment par la rotation des cultures afin de casser le cycle des adventices, des maladies et ravageurs. Le développement de stratégies de biocontrôle pourrait peut-être aussi offrir des possibilités de lutte intéressantes dans les années à venir.

b. Étapes clés de maîtrise (CCP) et actions correctives

Comme vu précédemment, selon le *Codex alimentarius* (FAO 2023) les CCP sont définis comme des étapes qui peuvent être monitorées grâce à la surveillance de paramètres permettant d’attester de la maîtrise du ou des dangers considérés. Les CCP identifiés dans la confection de l’ensilage de maïs sont présentés dans le tableau 16.

Tableau 16 – Points critiques pour la maîtrise isolés lors de la confection de l’ensilage de maïs

Étape	Danger(s)	Paramètre de surveillance	Limite critique	Méthode de surveillance	Mesures correctives
Récolte	Bactéries pathogènes	Teneur en MS	30% < MS < 35%	Taux de MS (visuel, analyse)	Conservateurs Hachage plus fin pour faciliter le tassement
	Moisissures / Mycotoxines	Teneur en Aflatoxines	Aflatoxines 5 µg/kg MS	Taux de MS (visuel, analyse) Kit ELISA	Écarter les parcelles contaminées, les orienter vers l’alimentation d’autres espèces pour lesquelles les seuils admissibles sont supérieurs

Distribution	Moissures / Mycotoxines	Avancée du front d'attaque	< 15 cm/j hiver < 25 cm/j été	Absence de développement fongique visuel	Écarter les zones contaminées
--------------	------------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	--	----------------------------------

Les autres étapes de la confection de l'ensilage de maïs ne sont pas considérées comme des CCP, mais plutôt comme des étapes dont la maîtrise repose sur le respect de bonnes pratiques agricoles et de fabrication.

Le suivi de la méthode HACCP et l'application des mesures préventives identifiées permet une confection optimale de l'ensilage de maïs : obtention et maintien de l'anaérobiose, bonne fermentation et acidification du silo. Le tout permettant de limiter le développement de la microflore pathogène et ainsi d'assurer une bonne conservation de l'aliment et donc sa sécurité.

Maintenant que les principales recommandations concernant la fabrication de l'ensilage de maïs ont été évoquées, nous allons voir que la culture du maïs est sujette à de nouveaux challenges avec l'impact du changement climatique sur la culture et la conservation du maïs fourrage.

- PARTIE 4 –

4. IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA CULTURE DU MAÏS ET SON ENSILAGE

Nous avons vu que la confection d'un ensilage de maïs nécessite la maîtrise de nombreux paramètres. Cependant, les conditions climatiques rencontrées lors de la culture, elles, ne sont pas maîtrisables, alors qu'elles peuvent directement influencer la nature et l'importance des dangers susceptibles d'intervenir au cours de la fabrication. Or, depuis plusieurs années, la notion de changement climatique a émergé dans le monde entier. Depuis la période préindustrielle (1850-1900), la température de la planète s'est élevée d'1,1°C et prévoit d'atteindre 1,5°C d'ici 2030, à cause de l'émission des gaz à effet de serre (6ème rapport du GIEC 2023). L'INRA et le CIRAD ont également travaillé avec Agrimonde-Terra sur la sécurité alimentaire mondiale à l'horizon 2050 en étudiant l'évolution de l'usage des terres (INRA, CIRAD 2016). Des études ont été réalisées pour essayer d'évaluer les impacts du changement climatique sur la culture du maïs et *in fine* sur la production d'ensilage et sa conservation.

4.1 Impact du changement climatique sur la culture du maïs

Le maïs est principalement cultivé dans le Grand Ouest français avec près de 60% des surfaces françaises dédiées au maïs fourrage (Beauvais, Cantat, Madeline 2021). Or, comme dans tout le pays, une hausse des températures et des sécheresses plus fréquentes sont constatées (Dubreuil et al. 2012). Cela a des conséquences sur la production végétale en termes de précocité, de stress hydrique et thermique.

Des simulations bioclimatiques ont été réalisées dans plusieurs études et notamment par (Beauvais, Cantat, Madeline 2021). Elles permettent d'envisager les tendances possibles d'ici 2100. En raison des températures plus élevées, on observe une modification des cycles de croissance du maïs. Les périodes de croissance sont plus courtes, en lien avec la notion d'UTC présentée dans la première partie de ce travail. Cette récolte plus précoce peut impacter la teneur en matière sèche du maïs lors de la récolte, ce qui peut nuire à la qualité de l'ensilage par la suite et notamment à sa capacité à fermenter. De plus, le changement thermique peut jouer sur

la stabilité des rendements. Les températures plus élevées, les périodes de sécheresse plus fréquentes et les événements climatiques plus extrêmes peuvent réduire les rendements du maïs du fait d'une biomasse inférieure. Les stress hydriques auxquels sont soumis les plants de maïs affectent leur croissance, leur maturité et leur fertilité en cas de pic de chaleur à la floraison. Pour finir, nous ne sommes pas à l'abri de voir l'émergence de nouvelles maladies et parasites des plantes liés aux modifications climatiques, pouvant la aussi affecter la qualité future de l'ensilage. Enfin, le maïs est une production demandeuse en eau. La raréfaction de cette ressource pose la question de l'irrigation des champs de maïs. Il est possible que, dans les années à venir, la zone de production se décale vers le nord et que, dans le sud, d'autres productions, comme le sorgho, moins gourmande en eau, remplace progressivement la culture du maïs. Cela sous-entend qu'il faudra alors aussi faire évoluer les pratiques de l'alimentation animale et en particulier du bétail laitier.

Impact sur la récolte et le hachage du maïs

Les modifications du climat vont avoir un impact direct sur la récolte du maïs en vue de son ensilage. Des conditions climatiques imprévisibles peuvent rendre plus difficile la gestion de la fenêtre de récolte du maïs. Que ce soient les précipitations importantes ou les périodes de sécheresse, il sera important de contrôler un maximum la teneur en matière sèche des grains afin de planifier la récolte à un stade optimal de maturité. L'humidité joue aussi un rôle lors du hachage de l'ensilage. Un maïs trop sec ou trop humide sera plus difficile à hacher de manière optimale et donc engendrera des problèmes sanitaires de conservation.

4.2 Impact du changement climatique sur la nature des dangers liés à la fabrication de l'ensilage de maïs

a. Impact sur le développement de microorganismes dans les silos

Comme vu précédemment, certaines bactéries sont inhibées lors de fortes températures, ce qui peut arriver notamment sous les bâches des silos conservés l'été. En modifiant le développement des microorganismes, les conditions climatiques peuvent aussi affecter le pH de l'ensilage et donc sa bonne conservation. Les températures élevées pendant la période de fermentation peuvent accélérer les processus de décomposition de la matière végétale et conduire à une fermentation inégale ou à la production de composés indésirables comme les

acides butyriques, au détriment de l'acide lactique. La qualité de l'ensilage pourra alors être compromise. De plus, des vagues de chaleur peuvent augmenter la température à l'intérieur du silo, surtout si le maïs est mal compacté, conduisant à une fermentation excessive engendrant une perte de nutriments. Une température supérieure à 30°C au-delà de 30 cm derrière le front d'attaque est anormale si le silo est ouvert à la bonne date, cela entraîne alors une dégradation rapide du silo (Arvalis 2021). Pour finir, les températures élevées peuvent causer la dilatation des matériaux de couverture, créant des espaces où l'air peut pénétrer, favorisant la croissance de micro-organismes aérobies pathogènes ou d'altération et compromettant la qualité finale de l'ensilage.

b. Impact sur les adventices pouvant se développer au champ

Les effets climatiques sur les adventices peuvent être directs en impactant le cycle de développement de la plante : levée plus rapide, dissémination des graines plus précoce. Ces effets peuvent également être indirects : pratiques culturales différentes (date de semis, irrigation) qui vont jouer sur la croissance des adventices et/ou la difficulté à les contrôler en amont de la levée des plants de maïs.

De plus, en fonction de leurs systèmes de photosynthèse C3 ou C4 les plantes seront favorisées de différentes manières (Gibot-Leclerc et al. 2009). Les plantes dites en « C3 » sont des adventices des régions tempérées, c'est le cas du chénopode par exemple. Elles seront favorisées par une augmentation environnementale de la concentration en CO₂. Quant aux plantes en « C4 » comme l'amarante, les températures élevées semblent leur être favorables.

De plus, la variabilité génétique des adventices fait qu'elles ont une meilleure capacité d'adaptation aux nouvelles conditions environnementales. L'efficacité des techniques de désherbage pourrait aussi être menacée par une meilleure reprise des adventices après le désherbage, une résistance accrue aux herbicides etc.

Globalement, le risque de voir une espèce adventice coloniser majoritairement les cultures est peu probable. Par contre, des changements de flores dans les champs et l'invasion de nouvelles espèces méditerranéennes est possible voire probable, les techniques de désherbage devront donc être adaptées.

c. Impact sur les moisissures et les mycotoxines

Les projections climatiques annonçant des températures en augmentation semblent favoriser le développement de certaines espèces fongiques au champ. Nous allons en particulier nous intéresser à la mycotoxine la plus dangereuse pour la santé humaine : l'aflatoxine B1. Le projet Aflafrance mené par l'ENVT entre 2019 et 2023, en association avec Arvalis, visait à étudier l'émergence des aflatoxines en France (Bailly et al. 2024). Historiquement, les aflatoxines n'étaient que très peu présentes en France. Or, depuis une dizaine d'année, leur présence est avérée. La carte présentée sur la figure 21 date de 2020, elle montre qu'*Aspergillus flavus*, principale espèce productrice d'AFB1, est maintenant présente partout en France. Même si la production d'aflatoxines n'est pas totalement corrélée à la présence d'*Aspergillus flavus*, ce dernier s'installe de plus en plus sur le territoire et les prédictions d'évolution du climat dans les années à venir laissent penser que cette implantation va se renforcer, même si en 2021 et en 2023, les conditions plus fraîches ne lui ont pas été favorables (Christian 2023).

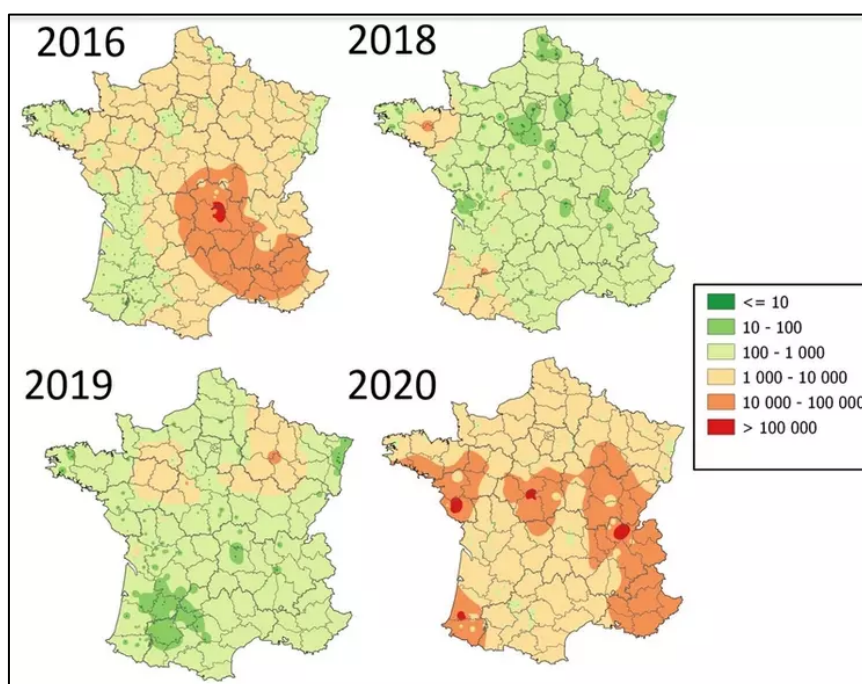


Figure 21 - Dénombrement d'*Aspergillus flavus* par année de récolte (en UFC par gramme de grains) (Arvalis 2020)

Il semble que parmi les paramètres influençant fortement la contamination des grains de maïs par les aflatoxines, un stress hydrique printanier joue un rôle important. Cela fragilise les plantes qui résistent moins bien à la colonisation par *Aspergillus flavus* et à la contamination aflatoxique qui suit, même si cette dernière n'a lieu qu'en fin de cycle de la plante. De ce fait,

il semblerait qu'une récolte précoce puisse permettre de réduire le risque de contamination (Orlando 2024).

4.3 Adaptations possibles des agriculteurs pour faire face à ces changements

Comme vu précédemment, la hausse des températures, raccourcit le cycle végétatif du maïs et, de ce fait, son rendement. Or, selon certaines études, cette hausse des températures pourrait être compensée par l'utilisation de variétés tardives (Tardieu, Welcker, Parent 2019). Les agriculteurs adaptent déjà l'utilisation des variétés aux régions et aux climats où ils cultivent le maïs. Par exemple, dans les années 1990, les variétés de maïs de précocité intermédiaire étaient utilisées au centre de la France (Dordogne), aujourd'hui, avec leurs caractéristiques de croissance ces dernières sont utilisées plus au Nord (Maine-et-Loire). Si les éleveurs adaptent leurs pratiques afin de maintenir une production optimale, selon les études de l'INRA (Tardieu, Welcker, Parent 2019), les semis devraient être avancés de 20 jours en moyenne en 2050 comparé à la période de 1975 à 2010 et les cycles biologiques des variétés devraient être allongés de 325 degrés-jours. En respectant cela, il semblerait que l'effet du changement climatique sur les rendements serait alors positif comme le montre la figure 22 : augmentation de 4,5% de la production de maïs à l'échelle européenne.

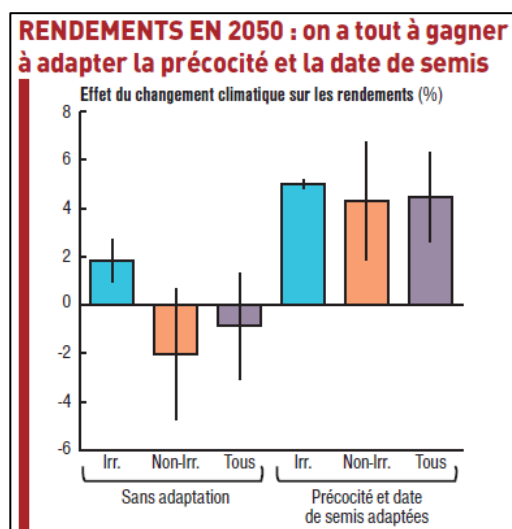


Figure 22 - Rendement du maïs attendu en 2050 à l'échelle européenne sous hypothèse modérée d'émission de CO2 (Tardieu, Welcker, Parent 2019)

Rendement exprimé en pourcentage du rendement moyen européen actuel, pour des cultures irriguées, non irriguées et au total, selon que les agriculteurs ont adaptés ou non les dates de semis et les précocités des variétés au réchauffement climatique.

Du fait des adaptations déjà réalisées par certains éleveurs dans certaines zones françaises, les semenciers ont déjà développé des gammes de précocité optimales, s'adaptant aux changements climatiques. Des variétés plus résistantes à la sécheresse et aux parasites sont étudiées. Néanmoins, il ne faut pas négliger les autres facteurs pouvant entrer en jeu d'ici-là comme l'émergence de nouveaux ravageurs du maïs, les politiques de gestion des intrants agricoles et la compétition pour l'eau.

Le changement climatique pose des défis significatifs pour la production de maïs et d'ensilage. Ces défis nécessitent une adaptation continue des pratiques agricoles, incluant la sélection de variétés plus résistantes, une meilleure gestion des récoltes, et des techniques de conservation pour assurer la qualité et la sécurité de l'ensilage dans un climat en évolution.

CONCLUSION

La qualité sanitaire des ensilages de maïs est un enjeu crucial pour la santé animale et humaine étant donnée sa place dans l'alimentation bovine en France. Cette thèse a mis en lumière les multiples contaminants susceptibles de contaminer, voire de se développer dans les ensilages, tels que les bactéries pathogènes, les moisissures, les levures, et les contaminants végétaux et chimiques. Ces contaminants peuvent avoir des effets délétères sur la santé animale et limiter les performances zootechniques, impactant directement les performances économiques des élevages. Certains peuvent également être une menace pour la sécurité des aliments destinés à l'homme en cas de transfert dans les produits animaux et en particulier le lait.

Les pratiques de fabrication des ensilages, de la récolte au stockage, jouent un rôle déterminant dans la prévention de ces contaminations. Il est essentiel d'adopter des méthodes rigoureuses pour limiter les risques sanitaires, notamment en optimisant les conditions de fermentation et en surveillant régulièrement les ensilages pour détecter la présence de contaminants. Cependant, les défis posés par le changement climatique ajoutent encore à la complexité de cette problématique. En France, les variations climatiques, telles que l'augmentation des températures, la modification des régimes de précipitations, et la fréquence accrue des événements extrêmes, sont des phénomènes qui pourront impacter directement les conditions de culture du maïs et la qualité des ensilages, mais aussi, au-delà, leur disponibilité à long terme. Ainsi, l'adaptation des pratiques agricoles et de gestion des ensilages sera cruciale pour répondre à ces nouveaux défis.

BIBLIOGRAPHIE

6ÈME RAPPORT DU GIEC, 2023. Publication du 6e rapport de synthèse du GIEC | Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. [en ligne]. 20 mars 2023. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.ecologie.gouv.fr/actualites/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec>

ADAMS, Richard, MCCARTY, Thomas, HUTCHINSON, Lawrence et THE PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY, 2019. Prevention and Control of Nitrate Toxicity in Cattle. *DAIReXNET* [en ligne]. 16 août 2019. [Consulté le 15 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://dairy-cattle.extension.org/prevention-and-control-of-nitrate-toxicity-in-cattle/>

AGENCE DE LA SANTÉ PUBLIQUE DU CANADA, 2012. Bacillus cereus, à l'exclusion du biovar anthracis : Fiche technique santé-sécurité : agents pathogènes. [en ligne]. 30 avril 2012. [Consulté le 31 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/biosecurite-biosurete-laboratoire/fiches-techniques-sante-securite-agentes-pathogenes-evaluation-risques/bacillus-cereus.html>

AGRESTE, 2023a. En 2023, les surfaces de maïs grain au plus bas depuis plus de 30 ans, celles de tournesol au plus haut depuis 25 ans. *Agreste Infos rapides - Grande culture* [en ligne]. mai 2023. [Consulté le 30 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraGcu2351/2023_51inforapgdscultures.pdf

AGRESTE, 2023b. En 2023, des rendements attendus en hausse pour les cultures d'automne. *Grandes cultures - n°07/10* [en ligne]. septembre 2023. Vol. Infos rapides, n° 107. [Consulté le 30 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraGcu23107/2023_107inforapgdscultures.pdf

AGRICONOMIE, 2023. Ensilage du maïs : ce qu'il faut savoir. *Agriconomie* [en ligne]. 15 octobre 2023. [Consulté le 26 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.agriconomie.com/blog/ensilage-mais/>

AGRICULTURE, PÊCHERIES ET ALIMENTATION QUÉBEC, 2021. Les agents pathogènes les plus souvent associés aux toxi-infections alimentaires : caractéristiques et aliments cibles. *MAPAQ* [en ligne]. 2021. [Consulté le 31 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Laboratoire/agents_pathogenes.pdf

ANSES, 2012. Aspergillus flavus et autres moisissures productrices d'aflatoxines. *Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments* [en ligne]. avril 2012. [Consulté le 2 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/MIC2012sa0053Fi.pdf>

ANSES, 2016. Avis de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation de l'Environnement et du Travail relatif à l'analyse des Plans de Surveillance et de Contrôle sur les substances indésirables en alimentation animale. *Saisine n°2015-SA-0076* [en ligne]. 4 août 2016. [Consulté le 4 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/ALAN2015SA0076.pdf>

ANSES, 2019. Escherichia coli entérohémorragiques (EHEC). *Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments* [en ligne]. mai 2019. [Consulté le 5 juin 2024].

Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2017SA0224Fi.pdf>

ANSES, 2020. *Listeria monocytogenes. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments* [en ligne]. 2020. N° Saisine n°2016-SA-0081. [Consulté le 5 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2016SA0081Fi.pdf>

ANSES, 2021a. *Salmonella spp. Saisine n°2016-SA-0080* [en ligne]. juin 2021. [Consulté le 6 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2016SA0080Fi.pdf>

ANSES, 2021b. *Bacillus cereus. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Bacillus cereus* [en ligne]. mars 2021. Vol. Saisine n°2016-SA-0075. [Consulté le 20 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2016SA0075Fi.pdf>

ARVALIS, 2012. Alimentation animale - Récolter le maïs fourrage au bon stade. *ARVALIS* [en ligne]. 6 septembre 2012. [Consulté le 30 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/recolter-au-meilleur-moment-pour-preserver-toute-la-richesse-de-la-plante>

ARVALIS, 2015. Plantes toxiques ou pas ? Déjouer les dangers potentiels des prairies. *Web-agri.fr* [en ligne]. 12 janvier 2015. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.web-agri.fr/sante-animale/article/106936/plantes-toxiques-ou-pas-dejouer-les-dangers-potentiels-des-prairies>

ARVALIS, 2018. Maïs fourrage, objectif qualité, du champ à l'auge. *Institut du végétal* [en ligne]. juillet 2018. [Consulté le 10 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/3415-mais-fourrage3493640180753265776.pdf

ARVALIS, 2020. *Le dénombrement d'Aspergillus flavi par année de récolte* [en ligne]. 2020. [Consulté le 18 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.reussir.fr/grandes-cultures/maladie-mais-la-presence-daspergillus-varie-fortement-selon-les-annees>

ARVALIS, 2021. Comment diagnostiquer rapidement l'état de conservation de l'ensilage ? *Web-agri.fr* [en ligne]. 18 août 2021. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.web-agri.fr/mais-fourrage/article/146340/comment-diagnostiquer-rapidement-l-etat-de-conservation-de-l-ensilage->

ARVALIS, 2022. Alimentation des ruminants - Les conservateurs d'ensilage d'herbe, comment ça marche ? *ARVALIS* [en ligne]. 7 avril 2022. [Consulté le 17 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/les-conservateurs-densilage-dherbe-comment-ca-marche>

ARVALIS, 2024. Maïs : quel groupe de précocité variétale peut-on encore semer ? *ARVALIS* [en ligne]. 23 mai 2024. [Consulté le 4 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/mais-quel-groupe-de-precocite-varietale-peut-encore-semer>

BAILLY, Jean-Denis, ARVALIS, ÉCOLE D'INGÉNIEUR DE PURPAN et INRAE, 2024. Implantation des *Aspergillus* section *Flavi* en France dans un contexte de changement climatique : impact sur la contamination myco-toxique du maïs à la récolte. In : *10ème journées Mycotoxines* [en ligne]. Montpellier. 30 mai 2024. [Consulté le 27 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/aflafrance>

- BAILLY, Sylviane et BAILLY, Jean-Denis, 2013. Les moisissures des ensilages. *Prévention nutritionnelle en élevage bovin*. 2013. Vol. Nutrition et toxicologie des bovins, pp. 120-123.
- BAILLY, Sylviane et BAILLY, Jean-Denis, 2017. Problématiques des mycotoxines en élevage, l'exemple des bovins. *Le Nouveau Praticien Vétérinaire* [en ligne]. 2017. Vol. 9, n° 37. [Consulté le 25 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://neva.fr/file.php/543/13-19%2520problematique%2520mycotoxines%2520BAT.pdf>
- BAYER, 2018. L'étiquette des produits phytosanitaires : un concentré d'informations pratiques ! : Bayer-Agri, conseils pour la protection des cultures. [en ligne]. 24 septembre 2018. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.bayer-agri.fr/sante/etiquette/>
- BAYER, 2022. Oui au maïs ! [en ligne]. octobre 2022. [Consulté le 5 juin 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.bayer-agri.fr/fileadmin/user_upload/42642-BAYER-FICHES-PLAIDOYER-MAIS.pdf
- BEAUVAIS, François, CANTAT, Olivier et MADELINE, Philippe, 2021. Le maïs ensilage dans le Grand-Ouest français face au changement climatique à l'horizon 2100. *Climatologie*. 2021. Vol. 18, pp. 2. DOI 10.1051/climat/202118002.
- BÉLANGER, France, 2020. Les plantes toxiques pour les ruminants. [en ligne]. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation Direction régionale de la Chaudière-Appalaches. 20 octobre 2020. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.agrireseau.net/documents/Document_103636.pdf
- BERNSTEIN, Nirit, SELA, Shlomo, PINTO, Riky et IOFFE, Marina, 2007. Evidence for Internalization of Escherichia coli into the Aerial Parts of Maize via the Root System. *Journal of Food Protection*. février 2007. Vol. 70, n° 2, pp. 471-475. DOI 10.4315/0362-028X-70.2.471.
- BILODEAU, Line, MARCOUX, Annie, MIVILLE, David, FRÉCHETTE, Isabelle et SAMSON, Véronique, 2020. Désherbage du maïs de grande culture. *Le RAP Réseau d'avertissements phytosanitaires* [en ligne]. 6 mai 2020. Vol. Fiche technique-Grandes cultures. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.agrireseau.net/documents/Document_100450.pdf
- BOISSE, Joanna, 2019. Atlas virtuel des plantes : Morelle noire / Solanum nigrum. [en ligne]. 10 mai 2019. [Consulté le 30 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://atlas.roslin.pl/plant/8321>
- BOLOMIER, Annie Claude, 1999. Ma Botanique: Chénopode blanc, Ansérine farineuse, Senousse, Herbe aux vendangeurs. [en ligne]. 1999. [Consulté le 30 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.annie-claude-bolomier.fr/flore-campagne/chenopode-blanc/>
- BORNAND, Christophe, 2018. Datura stramonium L. Stramoine commune. *infoflora.fr* [en ligne]. 2018. [Consulté le 30 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.infoflora.ch/fr/flore/datura-stramonium.html>
- BOUBET, Boris et GDS CREUSE, 2021. Le botulisme chez les bovins. *GDS Creuse* [en ligne]. 18 août 2021. [Consulté le 26 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.gdscreuse.fr/?p=8698>
- BOUSSIN, Axelle, 2019. Monographie Mercuriale. [en ligne]. 2019. [Consulté le 2 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://vegetox2.envt.fr/Vue/Accueil.php>
- BRENNER, F. W., VILLAR, R. G., ANGULO, F. J., TAUXE, R. et SWAMINATHAN, B.,

2000. *Salmonella* Nomenclature. *Journal of Clinical Microbiology*. juillet 2000. Vol. 38, n° 7, pp. 2465-2467. DOI 10.1128/JCM.38.7.2465-2467.2000.
- CARPENTIER, Bertrand, 2014. Maïs fourrage - Les étapes clés de la récolte. *ARVALIS* [en ligne]. 19 septembre 2014. [Consulté le 5 janvier 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/mais-fourrage-les-etapes-cles-de-la-recolte>
- CEUPPENS, Siele, UYTTENDAELE, Mieke, DRIESKENS, Katrien, RAJKOVIC, Andreja, BOON, Nico et VAN DE WIELE, Tom, 2012. Survival of *Bacillus cereus* Vegetative Cells and Spores during In Vitro Simulation of Gastric Passage. *Journal of Food Protection*. avril 2012. Vol. 75, n° 4, pp. 690-694. DOI 10.4315/0362-028X.JFP-11-481.
- CHAUCHEYRAS-DURAND, Frédérique, DUNIÈRE, Lysiane et FORANO, Evelyne, 2016. Comment garantir la sécurité microbiologique de la viande bovine ? *Viandes & Produits Carnés* [en ligne]. 21 novembre 2016. N° VPC-2016-32-4-3. [Consulté le 12 juin 2024]. Disponible à l'adresse : https://viandesetproduitscarnes.fr/phocadownload/vpc_vol_32/3243_chaucheyras-durand_securite_microbiologique_viande_bovine.pdf
- CHRISTIAN, Gloria, 2023. Maladie maïs : la présence d'*Aspergillus* varie fortement selon les années | Réussir Grandes Cultures. [en ligne]. 8 juin 2023. [Consulté le 27 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.reussir.fr/grandes-cultures/maladie-mais-la-presence-daspergillus-varie-fortement-selon-les-annees>
- CISMEF, 2013. *Amaranthus*. [en ligne]. 2013. [Consulté le 21 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.cismef.org/page/amaranthus>
- COSTEA, M., WEAVER, S. E. et TARDIF, F. J., 2004. The biology of Canadian weeds. 130. *Amaranthus retroflexus* L., *A. powellii* S. Watson and *A. hybridus* L. *Canadian Journal of Plant Science*. 1 avril 2004. Vol. 84, n° 2, pp. 631-668. DOI 10.4141/P02-183.
- CRESSEY, Peter, KING, Nicola et SOBOLEVA, Tanya, 2016. RISK PROFILE: BACILLUS CEREUS IN DAIRY PRODUCTS. *MPI Technical Paper No: 2016/58* [en ligne]. novembre 2016. [Consulté le 31 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.mpi.govt.nz/dmsdocument/14149-Risk-profile-Bacillus-Cereus-in-dairy-products>
- DANTE, Books of, 2017. La mercuriale (*Mercurialis annua*). [*Books of*] Dante [en ligne]. 13 octobre 2017. [Consulté le 30 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://booksofdante.wordpress.com/2017/10/13/la-mercuriale-mercurialis-annua/>
- DEMARQUILLY, C., 1998. Ensilage et contamination du lait par les spores butyriques. *INRA Prod. Anim.*, 1998, 11 (5), 359-364. novembre 1998. pp. 359-364.
- DGCCRF, 2004. Hygiène alimentaire - Le plan de maîtrise sanitaire : les prérequis et l'HACCP. *Ministère de l'économie des finances et de la souveraineté industrielle et numérique* [en ligne]. 2004. [Consulté le 19 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/hygiene-alimentaire-plan-maitrise-sanitaire-prerequis-et-lhaccp>
- DIEKMAN, Mark A. et GREEN, Mike L., 1992. Mycotoxins and reproduction in domestic livestock. *Journal of Animal Science*. 1 mai 1992. Vol. 70, n° 5, pp. 1615-1627. DOI 10.2527/1992.7051615x.
- DRIEHUIS, F., WILKINSON, J.M., JIANG, Y., OGUNADE, I. et ADESOGAN, A.T., 2018. Silage review: Animal and human health risks from silage. *Journal of Dairy Science*. mai 2018. Vol. 101, n° 5, pp. 4093-4110. DOI 10.3168/jds.2017-13836.

DRIEHUIS, Frank, 2011. Occurrence of mycotoxins in silage. In : [en ligne]. 16 novembre 2011. [Consulté le 6 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/307907306_Occurrence_of_mycotoxins_in_silage

DRIEHUIS, Frank, 2013. Silage and the safety and quality of dairy foods: a review. *Agricultural and Food Science*. 27 mars 2013. Vol. 22, n° 1, pp. 16-34. DOI 10.23986/afsci.6699.

DUBREUIL, Vincent, PLANCHON, Olivier, LAMY, Chloé, BONNARDOT, Valerie et QUÉNOL, Hervé, 2012. Le changement climatique dans la France de l'Ouest : observations et tendances. In : *Changement climatique dans l'Ouest* [en ligne]. Presses Universitaires de Rennes. pp. 19-30. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/hal-00780035>

DUCOURTHIAL, Philippe et HANRYON, Lucile, 2018. Informations maïs ensilage. *Chambre d'Agriculture de la Creuse* [en ligne]. 27 août 2018. [Consulté le 25 juin 2024]. Disponible à l'adresse : https://creuse.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/098_Inst-Creuse/PDF/grandes_cultures/2018_bulletins_mais_et_resultats_ms/Bulletin_mais_n__2_du_27_aout_2018.pdf

DUNIÈRE, L., SINDOU, J., CHAUCHEYRAS-DURAND, F., CHEVALLIER, I. et THÉVENOT-SERGENTET, D., 2013. Silage processing and strategies to prevent persistence of undesirable microorganisms. *Animal Feed Science and Technology*. juin 2013. Vol. 182, n° 1-4, pp. 1-15. DOI 10.1016/j.anifeedsci.2013.04.006.

DUPUY, Laura, DUCOURTIEUX, Camille et LESTRADE, Marie, 2023. Plantes toxiques : tour d'horizon dans les prairies et les couverts. *Chambre d'Agriculture de la Dordogne* [en ligne]. mars 2023. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.inn-ovin.fr/wp-content/uploads/2023/03/Plantes-toxiques-et-paturage-des-couverts.pdf>

FAO, 2023. CC6261EN/1/06.23 : *Determine critical control points – Step 7, Principle 2* [en ligne]. FAO Good Hygiene Practices (GHP) and Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) Toolbox for Food Safety. Rome, Italy : FAO. [Consulté le 26 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cc6261en>

FENLON, D.R., WILSON, J. et DONACHIE, W., 1996. The incidence and level of *Listeria monocytogenes* contamination of food sources at primary production and initial processing. *Journal of Applied Bacteriology*. décembre 1996. Vol. 81, n° 6, pp. 641-650. DOI 10.1111/j.1365-2672.1996.tb03559.x.

FÉRARD, Alexis, 2017. Le maïs plante entière ensilée dans la ration des bovins. *Le Point Vétérinaire.fr* [en ligne]. 1 mars 2017. [Consulté le 26 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.lepointveterinaire.fr/publications/le-point-veterinaire/article-rural/n-373/le-mais-plante-entiere-ensilee-dans-la-ration-des-bovins.html>

FOURNIER, Alain, 2016. LES QUATRE FACTEURS DE SUCCÈS DE L'ENSILAGE DE MAÏS. [en ligne]. 2016. [Consulté le 4 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.agrireseau.net/bovinsboucherie/documents/Les%20quatre%20facteurs%20de%20succ%C3%A8s%20de%20l'ensilage%20de%20ma%C3%AFs.pdf>

FOYER, Christine H., VALADIER, Marie-Hélène, MIGGE, Andrea et BECKER, Thomas W., 1998. Drought-Induced Effects on Nitrate Reductase Activity and mRNA and on the Coordination of Nitrogen and Carbon Metabolism in Maize Leaves1. *Plant Physiology*. 1 mai 1998. Vol. 117, n° 1, pp. 283-292. DOI 10.1104/pp.117.1.283.

GALTIER, Pierre, DRAGACCI, Sylvain, JANIN, Françoise, LE BIZEC, Bruno, LEBLANC, Jean-Charles, OSWALD, Isabelle, BUREL, Christine, ETIENNE, Michel, GROSJEAN, François, JOUANY, Jean-Pierre, PARAGON, Bernard-Marie, PARENT-MASSIN, Dominique, THOUVENOT, Daniel, FREMY, Jean-Marc, GUERRE, Philippe, HOSSEN, Virginie, GALLOTTI, Sophie et MANACH, Anne, 2006. Évaluation des risques liés à la présence de mycotoxines dans les chaînes alimentaires humaine et animale. *Afssa* [en ligne]. décembre 2006. [Consulté le 16 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP-Ra-Mycotoxines2009.pdf>

GDS MAYENNE, 2020. Les plantes toxiques : Le danger est dans le pré | M-ELEVAGE. [en ligne]. 3 mars 2020. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.m-elevage.fr/les-plantes-toxiques-le-danger-est-dans-le-pre/>

GDS SAVOIE, 2017. La Salmonelle, une menace grandissante pour notre filière au lait cru. [en ligne]. septembre 2017. [Consulté le 26 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.frgdsaura.fr/assets/uploads/GDS%20des%20Savoie/Plans%20maladies/Salmonelles%20-%20plaquette%20dinformations.pdf>

GIBOT-LECLERC, Stéphanie, CORDEAU, Stéphane, CHAUVEL, Bruno et BONIN, Ludovic, 2009. Changement climatique : pour les mauvaises herbe. *Perspectives agricoles* [en ligne]. 2009. N° 356. [Consulté le 17 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.perspectives-agricoles.com/sites/default/files/imported_files/356_3493142917852811534.pdf

GIRAUD, Etienne, BAYOURTHE, Corrine, BELLOC, Catherine, COLIN, Pierre, DEPORTES, Isabelle, FORANO, Evelyne et GAUTHIER, Dominique, 2020. Identification et caractérisation des dangers microbiens liés aux matières premières d'origine végétale utilisées en alimentation animale. [en ligne]. mai 2020. [Consulté le 12 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/ALAN2015SA0191Ra.pdf>

HUSSEIN, H. S., 2007. Prevalence and pathogenicity of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in beef cattle and their products^{1,2}. *Journal of Animal Science*. 1 mars 2007. Vol. 85, n° suppl_13, pp. E63-E72. DOI 10.2527/jas.2006-421.

INRA et CIRAD, 2016. Etude prospective sur l'usage des terres et la sécurité alimentaire à l'horizon 2050. *Agrimonde-Terra* [en ligne]. 2016. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.inrae.fr/actualites/prospective-agrimonde-terra-usage-terres-securite-alimentaire-mondiale-2050>

INSTITUT PASTEUR, 2021. Candidoses. *Institut Pasteur* [en ligne]. juin 2021. [Consulté le 3 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.pasteur.fr/fr/centre-medical/fiches-maladies/candidoses>

INTERCÉRÉALES, 2022. Le maïs. *Intercéréales* [en ligne]. juillet 2022. [Consulté le 30 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.intercereales.com/le-mais>

JESSER, Kelsey J. et LEVY, Karen, 2020. Updates on defining and detecting diarrheagenic *Escherichia coli* pathotypes. *Current Opinion in Infectious Diseases*. octobre 2020. Vol. 33, n° 5, pp. 372-380. DOI 10.1097/QCO.0000000000000665.

JURQUET, Julien, 2016. Alimentation des vaches laitières : bien maîtriser les fondamentaux. *Institut de l'Élevage* [en ligne]. 4 juillet 2016. [Consulté le 17 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://idele.fr/detail-article/alimentation-des-vaches-laitieres-bien-maitriser-les-fondamentaux>

KEEN, James E., LAEGREID, William W., CHITKO-MCKOWN, Carol G., DURSO, Lisa M. et BONO, James L., 2010. Distribution of Shiga-Toxigenic *Escherichia coli* O157 in the Gastrointestinal Tract of Naturally O157-Shedding Cattle at Necropsy. *Applied and Environmental Microbiology*. août 2010. Vol. 76, n° 15, pp. 5278-5281. DOI 10.1128/AEM.00400-10.

KLEINSCHMIT, D.H. et KUNG, L., 2006. A Meta-Analysis of the Effects of *Lactobacillus buchneri* on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn and Grass and Small-Grain Silages. *Journal of Dairy Science*. octobre 2006. Vol. 89, n° 10, pp. 4005-4013. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(06)72444-4.

KÖHLER, Franz Eugen, 1887. *Datura stramonium*. *Köhler's Medizinal-Pflanzen* [en ligne]. [Consulté le 2 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Datura_stramonium&oldid=216279655

KRIŽEK, M., KALAČ, P. et PETERKA, J., 1993. Biogenic amines in silage 3. The occurrence of six biogenic amines in farm-scale grass and maize silages. *Archiv für Tierernaehrung*. janvier 1993. Vol. 45, n° 2, pp. 131-137. DOI 10.1080/17450399309386094.

LAIGNEL, Edouard et MORAZIN, Serge, 2020. Distribuer de l'ensilage de maïs bien conservé pour une meilleure efficacité alimentaire. [en ligne]. 25 août 2020. [Consulté le 3 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.littoral-normand.fr/actualites/detail-actualite/distribuer-de-lensilage-de-mais-bien-conserve-pour-une-meilleure-efficacite-alimentaire.html>

LAMY GRANDIDIER, Claire, 2021. Six plantes de prairies toxiques pour les bovins. [en ligne]. 21 mai 2021. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.tema-agriculture-terroirs.fr/cultivar-elevage/cultures-fourrageres/6-plantes-de-prairies-toxiques-pour-les-bovins-879723.php>

LEFEBVRE, Germain et LAFRENIÈRE, Carole, 2015. La conservation des ensilages : Nouvelles réalités, nouveaux outils. *Colloque sur les plantes fourragères* [en ligne]. 2015. [Consulté le 24 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.agrireseau.net/documents/Document_91978.pdf

LINGAAS, Frode et TVEIT, Borghild, 1992. Etiology of Acetonemia in Norwegian Cattle. 2. Effect of Butyric Acid, Valeric Acid, and Putrescine. *Journal of Dairy Science*. septembre 1992. Vol. 75, n° 9, pp. 2433-2439. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(92)78004-7.

MAHANNA, Bill et PIONEER, DuPont, 2018. Le contrôle des paramètres de fermentation, de la qualité et des pertes en ensilage. In : *Colloque sur les plantes fourragères* [en ligne]. CRAAQ, Drummondville, QC. 22 février 2018. [Consulté le 8 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.agrireseau.net/documents/Document_97131.pdf

MECHEKOUR, Franck, 2023. Le datura, une plante hyper-toxique à surveiller de près | Réussir lait. [en ligne]. 10 mai 2023. [Consulté le 2 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.reussir.fr/lait/le-datura-une-plante-hyper-toxique-surveiller-de-pres>

MILCENT, Jean-Pascal, 2011. *Illustration de la flore de Coste « Mercurialis annua L. »* [en ligne]. 10 juin 2011. [Consulté le 2 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.tela-botanica.org/eflore/>

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 2019. *Salmonella spp. Annexe 1* [en ligne]. [Consulté le 10 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/96787?token=841b73d67b9844c0a84f0248435941e801>

c571bebe78d406d68055009243856f

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2011. Les Bacillus cereus. *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. 6 septembre 2011. [Consulté le 31 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/les-bacillus-cereus>

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2017. La listériose. *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. 24 août 2017. [Consulté le 30 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/la-listeriose>

MOQUET, Michel, 2022. Maïs fourrage : concilier rendement et qualité. [en ligne]. 1 juin 2022. [Consulté le 5 juin 2024]. Disponible à l'adresse : https://afpf-asso.fr/_objects/tao_medias/file/2022-06-01-mais-fourrage-concilier-rdt-et-qualite-salon-h-f-2022-6018.pdf

NGUYEN-THE, Christophe, CARLIN, Frédéric et GUINEBRETIERE, Marie-Hélène, 2003. Bacillus cereus et sécurité des aliments. *Bull.Soc.Fr.Microbiol.*,18,(2),2003. INRA. 2003. pp. 104-112.

NOTERMANS, S, DUFRENNE, J et OOSTEROM, J, 1981. Persistence of Clostridium botulinum type B on a cattle farm after an outbreak of botulism. *Applied and Environmental Microbiology*. janvier 1981. Vol. 41, n° 1, pp. 179-183. DOI 10.1128/aem.41.1.179-183.1981.

OGUNADE, I.M., MARTINEZ-TUPPIA, C., QUEIROZ, O.C.M., JIANG, Y., DROUIN, P., WU, F., VYAS, D. et ADESOGAN, A.T., 2018. Silage review: Mycotoxins in silage: Occurrence, effects, prevention, and mitigation. *Journal of Dairy Science*. mai 2018. Vol. 101, n° 5, pp. 4034-4059. DOI 10.3168/jds.2017-13788.

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, 2023. Principaux repères sur les mycotoxines. [en ligne]. 2 octobre 2023. [Consulté le 2 novembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/mycotoxins>

ORLANDO, Béatrice, 2024. Aflatoxines sur maïs : « Les projections climatiques laissent présager une hausse du risque de contaminations ». *ARVALIS* [en ligne]. 8 février 2024. [Consulté le 27 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/aflatoxines-sur-mais-les-projections-climatiques>

PAHLOW, Günter, MUCK, Richard E., DRIEHUIS, Frank, ELFERINK, Stefanie J. W. H. Oude et SPOELSTRA, Sierk F., 2003. Microbiology of Ensiling. In : BUXTON, Dwayne R., MUCK, Richard E. et HARRISON, Joseph H. (éd.), *Agronomy Monographs* [en ligne]. Madison, WI, USA : American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. pp. 31-93. [Consulté le 11 juillet 2024]. ISBN 978-0-89118-234-4. Disponible à l'adresse : <http://doi.wiley.com/10.2134/agronmonogr42.c2>

PARAGON, Bernard Marie, ANDRIEU, Jean-Paul, BRUNSCHWIG, Philippe, GAILLARD, François, GRIESS, Daniel, HEUCHEL, Vincent, PIRIOU, Bernard, WEISS, Philippe et VALENTIN, Sandrine, 2004. BONNES PRATIQUES DE FABRICATION DE L'ENSILAGE POUR UNE MEILLEURE MAITRISE DES RISQUES SANITAIRES. In : [en ligne]. janvier 2004. [Consulté le 9 octobre 2023]. Disponible à l'adresse : <https://docplayer.fr/10250958-Bonnes-pratiques-de-fabrication-de-l-ensilage-pour-une-meilleure-maitrise-des-risques-sanitaires-janvier-2004.html>

PINTO, Wilmer et ORSINI, Giovannina, 2010. *Synopsis of subgenus Amaranthus*

(*Amaranthus*, *Amaranthaceae*) in *Venezuela*. [en ligne]. [Acta Botanica Venezuelica]. octobre 2010. [Consulté le 8 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/236899301_Synopsis_of_subgenus_Amaranthus_Amaranthus_Amaranthaceae_in_Venezuela33. 329-356

POPOFF, Michel R et BOUVET, Philippe, 2009. Clostridial Toxins. *Future Microbiology*. octobre 2009. Vol. 4, n° 8, pp. 1021-1064. DOI 10.2217/fmb.09.72.

QUEIROZ, O.C.M., OGUNADE, I.M., WEINBERG, Z. et ADESOGAN, A.T., 2018. Silage review: Foodborne pathogens in silage and their mitigation by silage additives. *Journal of Dairy Science*. mai 2018. Vol. 101, n° 5, pp. 4132-4142. DOI 10.3168/jds.2017-13901.

RÈGLEMENT EUROPÉEN, 2003. *DIRECTIVE 2003/100/CE DE LA COMMISSION du 31 octobre 2003 modifiant l'annexe I de la directive 2002/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 7 mai 2002 sur les substances indésirables dans les aliments pour animaux* [en ligne]. Journal officiel de l'Union Européenne. [Consulté le 25 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:285:0033:0037:FR:PDF>

RÈGLEMENT EUROPÉEN, 2016. RECOMMANDATION (UE) 2016/ 1319 DE LA COMMISSION - du 29 juillet 2016 - modifiant la recommandation 2006/ 576/ CE en ce qui concerne le déoxynivalénol, la zéaralénone et l'ochratoxine A dans les aliments pour animaux familiers. [en ligne]. 29 juillet 2016. [Consulté le 25 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016H1319&qid=1716499987696>

RÈGLEMENT EUROPÉEN, 2023. RÈGLEMENT (UE) 2023/915 DE LA COMMISSION du 25 avril 2023 concernant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires et abrogeant le règlement (CE) no 1881/2006. *Journal officiel de l'Union européenne* [en ligne]. 25 avril 2023. [Consulté le 25 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : https://publications.europa.eu/resource/cellar/791311ae-ae0-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0009.01/DOC_1

ROIGÉ, Marcela Beatriz, ARANGUREN, Sandra Mariela, RICCIO, María Belén, PEREYRA, Silvia, SORACI, Alejandro Luis et TAPIA, María Ofelia, 2009. Mycobiota and mycotoxins in fermented feed, wheat grains and corn grains in Southeastern Buenos Aires Province, Argentina. *Revista Iberoamericana de Micología*. octobre 2009. Vol. 26, n° 4, pp. 233-237. DOI 10.1016/j.riam.2009.03.003.

ROUILLÉ, Benoît, THUAL, Julien, BOUTON, Laurent et CAUDRILLIER, Jérôme, 2012. Fiches Sanitaires Coproduits - Spores Butyriques. *Comité National des Coproduits* [en ligne]. Institut de l'élevage, Ademe. mai 2012. [Consulté le 23 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/ALAN2015SA0191Ra.pdf>

ROY, Christelle, 2013. Risques sanitaires associés aux fourrages conservés. [en ligne]. 5 juillet 2013. [Consulté le 4 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://gds19.org/Docs/PDF/UP/2013/UP-05-07-13.pdf>

RUOHO, O, 2007. AN EPIDEMIC OF SALMONELLOSIS CAUSED BY SILAGE CONTAINING SALMONELLA AT A DAIRY FARM. In : [en ligne]. Tartu, Estonia. 17 juin 2007. pp. 882-884,. [Consulté le 7 juin 2024]. Estonian University of Life Sciences, Jõgeva Plant Breeding Institute, Estonian Research Institute of Agriculture. Disponible à l'adresse : https://www.isah-soc.org/userfiles/downloads/proceedings/Proc_ISAH_2007_Volume_II/164_Ruoho.pdf

SCHODER, Dagmar, MELZNER, Daniela, SCHMALWIESER, Alois, ZANGANA, Abdoulla, WINTER, Petra et WAGNER, Martin, 2011. Important Vectors for *Listeria monocytogenes* Transmission at Farm Dairies Manufacturing Fresh Sheep and Goat Cheese from Raw Milk. *Journal of Food Protection*. juin 2011. Vol. 74, n° 6, pp. 919-924. DOI 10.4315/0362-028X.JFP-10-534.

SCOHY, Delphine, 2021. Ensilage plante entière, maïs épi ou maïs grain humide : à chacun sa récolte. *Web-agri.fr* [en ligne]. 30 août 2021. [Consulté le 27 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.web-agri.fr/ensiler/article/181243/ensilage-plante-entiere-mais-epi-ou-mais-grain-humide-a-chacun-sa-recolte>

SINGH, Pallavi, SHA, Qiong, LACHER, David W., DEL VALLE, Jacquelyn, MOSCI, Rebekah E., MOORE, Jennifer A., SCRIBNER, Kim T. et MANNING, Shannon D., 2015. Characterization of enteropathogenic and Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in cattle and deer in a shared agroecosystem. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* [en ligne]. 1 avril 2015. Vol. 5. [Consulté le 18 juin 2024]. DOI 10.3389/fcimb.2015.00029. Disponible à l'adresse : http://www.frontiersin.org/Cellular_and_Infection_Microbiology/10.3389/fcimb.2015.00029/abstract

SQUIRE, Robert A., 1981. Ranking Animal Carcinogens: A Proposed Regulatory Approach. *Science*. 20 novembre 1981. Vol. 214, n° 4523, pp. 877-880. DOI 10.1126/science.7302565.

STORM, Ida, SORENSEN, Jens Laurids, RASMUSSEN, Rie Romme et NIELSEN, Kristian Fog, 2008. Mycotoxins in silage. *Stewart Postharvest Review*. décembre 2008. Vol. 4, n° 6, pp. 1-12. DOI 10.2212/spr.2008.6.4.

STREIT, Elisabeth, SCHATZMAYR, Gerd, TASSIS, Panagiotis, TZIKA, Eleni, MARIN, Daniela, TARANU, Ionelia, TABUC, Cristina, NICOLAU, Anca, APRODU, Iuliana, PUEL, Olivier et OSWALD, Isabelle P., 2012. Current Situation of Mycotoxin Contamination and Co-occurrence in Animal Feed—Focus on Europe. *Toxins*. 1 octobre 2012. Vol. 4, n° 10, pp. 788-809. DOI 10.3390/toxins4100788.

STUEBER, Kurt, 2007a. *Solanum nigrum* L. [en ligne]. 2007. [Consulté le 21 juin 2024]. Disponible à l'adresse : www.biolib.de

STUEBER, Kurt, 2007b. *Chenopodium album* L. [en ligne]. 2007. [Consulté le 3 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.biolib.de/>

TARDIEU, F, WELCKER, Claude et PARENT, Boris, 2019. Changement climatique : des rendements maintenus en adaptant la précocité du maïs. *Perspectives Agricoles* [en ligne]. 1 janvier 2019. [Consulté le 21 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.perspectives-agricoles.com/recherche-agronomie/changement-climatique-des-rendements-maintenus-en-adaptant-la-precocite>

VALACTA, 2017. Guide sur l'interprétation des analyses d'ensilages. [en ligne]. 2017. [Consulté le 5 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://lactanet.ca/guide-sur-linterpretation-des-analyses-densilages/>

VAZ, Andreia, CABRAL SILVA, Ana C., RODRIGUES, Paula et VENÂNCIO, Armando, 2020. Detection Methods for Aflatoxin M1 in Dairy Products. *Microorganisms*. 12 février 2020. Vol. 8, n° 2, pp. 246. DOI 10.3390/microorganisms8020246.

VILAR, M.J., YUS, E., SANJUÁN, M.L., DIÉGUEZ, F.J. et RODRÍGUEZ-OTERO, J.L., 2007. Prevalence of and Risk Factors for *Listeria* Species on Dairy Farms. *Journal of Dairy*

Science. novembre 2007. Vol. 90, n° 11, pp. 5083-5088. DOI 10.3168/jds.2007-0213.

WEAVER, Alexandra C., WEAVER, Daniel M., ADAMS, Nicholas et YIANNIKOURIS, Alexandros, 2021. Co-Occurrence of 35 Mycotoxins: A Seven-Year Survey of Corn Grain and Corn Silage in the United States. *Toxins*. 23 juillet 2021. Vol. 13, n° 8, pp. 516. DOI 10.3390/toxins13080516.

WIETE, 2019. *Amaranthus retroflexus* L. (Amarante réfléchie). [en ligne]. 21 août 2019. [Consulté le 30 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://identify.plantnet.org/fr/k-south-tropical-africa/observations/1004743442>

YAZAR, Selma et OMURTAG, Gülden Z., 2008. Fumonisins, Trichothecenes and Zearalenone in Cereals. *International Journal of Molecular Sciences*. 31 octobre 2008. Vol. 9, n° 11, pp. 2062-2090. DOI 10.3390/ijms9112062.

ZAIN, Mohamed E., 2011. Impact of mycotoxins on humans and animals. *Journal of Saudi Chemical Society*. avril 2011. Vol. 15, n° 2, pp. 129-144. DOI 10.1016/j.jscs.2010.06.006.

Nom : Genottin

Prénom : Estelle

Titre : **Qualité sanitaire des ensilages de maïs et ses conséquences en production laitière**

Résumé :

L'ensilage de maïs est une méthode de conservation du fourrage largement utilisée en alimentation animale. Cependant, la qualité sanitaire de cet ensilage peut être compromise par la présence de contaminants de différente nature tels que des bactéries pathogènes, des moisissures, des mycotoxines, des levures, mais également des végétaux toxiques et des produits chimiques. Certains de ces contaminants peuvent proliférer pendant le processus de fermentation ou ensuite lors du stockage, altérant la valeur nutritionnelle de l'ensilage et pouvant affecter la santé des animaux qui en consomment. Dans cette thèse, nous analysons quelles mesures préventives et quels contrôles peuvent être effectués, tout au long de la fabrication et de la conservation de cet aliment, afin d'en garantir la qualité sanitaire. Pour cela, nous utilisons l'approche HACCP. Enfin, les changements climatiques actuels vont modifier la nature des dangers et les risques associés en influençant la culture et les conditions de stockage du maïs et en favorisant la présence de certains agents pathogènes. La maîtrise de toutes les étapes de fabrication, de la parcelle au stockage est donc primordiale pour minimiser les risques sanitaires.

Mots-clés : Ensilage de maïs, qualité sanitaire, contaminants, santé animale, santé humaine, HACCP

Last name: Genottin

First name: Estelle

Title: **Sanitary quality of maize silage and its impact in milk production**

Abstract:

Maize silage is a method of preserving fodder that is widely used in animal feed. However, the sanitary quality of silage can be compromised by the presence of contaminants of different nature such as pathogenic bacteria, molds, mycotoxins, yeasts but also toxic plants and chemicals. Some of these contaminants can proliferate during the fermentation process or after during storage, altering the nutritional value of the silage and potentially affecting the health of the animals that ingest it. In this thesis, we analyze what preventive measures and controls can be carried out throughout the processing and conservation of this feed, in order to guarantee its sanitary quality. To do this, we used the HACCP approach. Finally, current climate change will modify the nature of the hazards and associated risks by influencing the cultivation and storage conditions of corn and by promoting the presence of certain pathogens. Controlling all stages of silage making, from the field to storage, is therefore essential to minimize health risks.

Key words: maize silage, sanitary quality, contaminants, animal health, human health, HACCP