



CARNETS
DE
SCIENCES

Sylviane Dragacci
Nadine Zakhia-Rozis
Pierre Galtier

Danger dans l'assiette

éditions
Quæ

Sylviane Dragacci
Nadine Zakhia-Rozis
Pierre Galtier

Danger dans l'assiette

Collection Carnets de sciences

Les secrets des algues

Véronique Leclerc, Jean-Yves Floc'h
2010, 168 p.

La planète Fleurs

Gérard Guillot
2010, 208 p.

Les trésors des Abysses

Daniel Desbruyères
2010, 184 p.

Bonnes bactéries et bonne santé

Gérard Corthier
2011, 128 p.

La faune des forêts et l'homme

Roger Fichant
2011, 184 p.

Éditions Quæ
RD 10

78026 Versailles Cedex, France

© Éditions Quæ, 2011
ISBN: 978-2-7592-0944-6
ISSN: 2110-2228

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.



« Si d'aventure il avait une corbeille pleine de pommes,
et qu'il appréhendât que quelques-unes ne fussent pourries,
et qu'il voulût les ôter [...], comment s'y prendrait-il pour le faire ?
Ne commencerait-il pas tout d'abord à vider sa corbeille ;
et après cela, regardant toutes ces pommes les unes après les autres,
ne choisirait-il pas celles-là seules qu'il verrait n'être point gâtées ;
et, laissant là les autres, ne les remettrait-il pas dans son panier ? »

Les Méditations métaphysiques, Les réponses.

René Descartes

SOMMAIRE

Moisissures et mycotoxines	9
■ Des moisissures sur nos aliments	11
■ Premier rendez-vous avec les moisissures	16
■ Des auxiliaires technologiques pourtant indispensables	16
■ Pourquoi les moisissures fabriquent-elles des mycotoxines ?	18
■ Les moisissures adorent l'humidité	20
■ Des moisissures presque partout	22
■ Des mycotoxines dans les aliments	24
■ Des contaminants dangereux	27
■ Quand les mycotoxines empruntent la chaîne alimentaire	30
■ Des moisissures résistantes et des mycotoxines ultrarésistantes!	35
■ Les mycotoxines: une question de santé publique	36
■ Les mycotoxines se respirent aussi!	39
Quels sont les effets sur la santé de l'homme et des animaux ?	43
■ Ce que l'histoire nous apprend	45
■ Alors comment définir la toxicité des mycotoxines ?	53
■ Quels sont les mécanismes d'action des principales mycotoxines ?	54
■ Les mycotoxines peuvent-elles être néfastes pour les animaux ?	70
■ Des études de toxicité utiles pour tous	76
Que deviennent les mycotoxines une fois absorbées ?	79
■ Enquêtes au laboratoire	81
■ Comment s'organise le devenir des mycotoxines dans l'organisme ?	82
■ Quelles sont les voies d'absorption ?	84
■ Quel métabolisme pour les mycotoxines ?	88

■ Quelles sont les voies d'élimination ?	95
■ Quel risque de résidus dans les productions animales ?	96
■ Quel besoin de connaissance ?	102

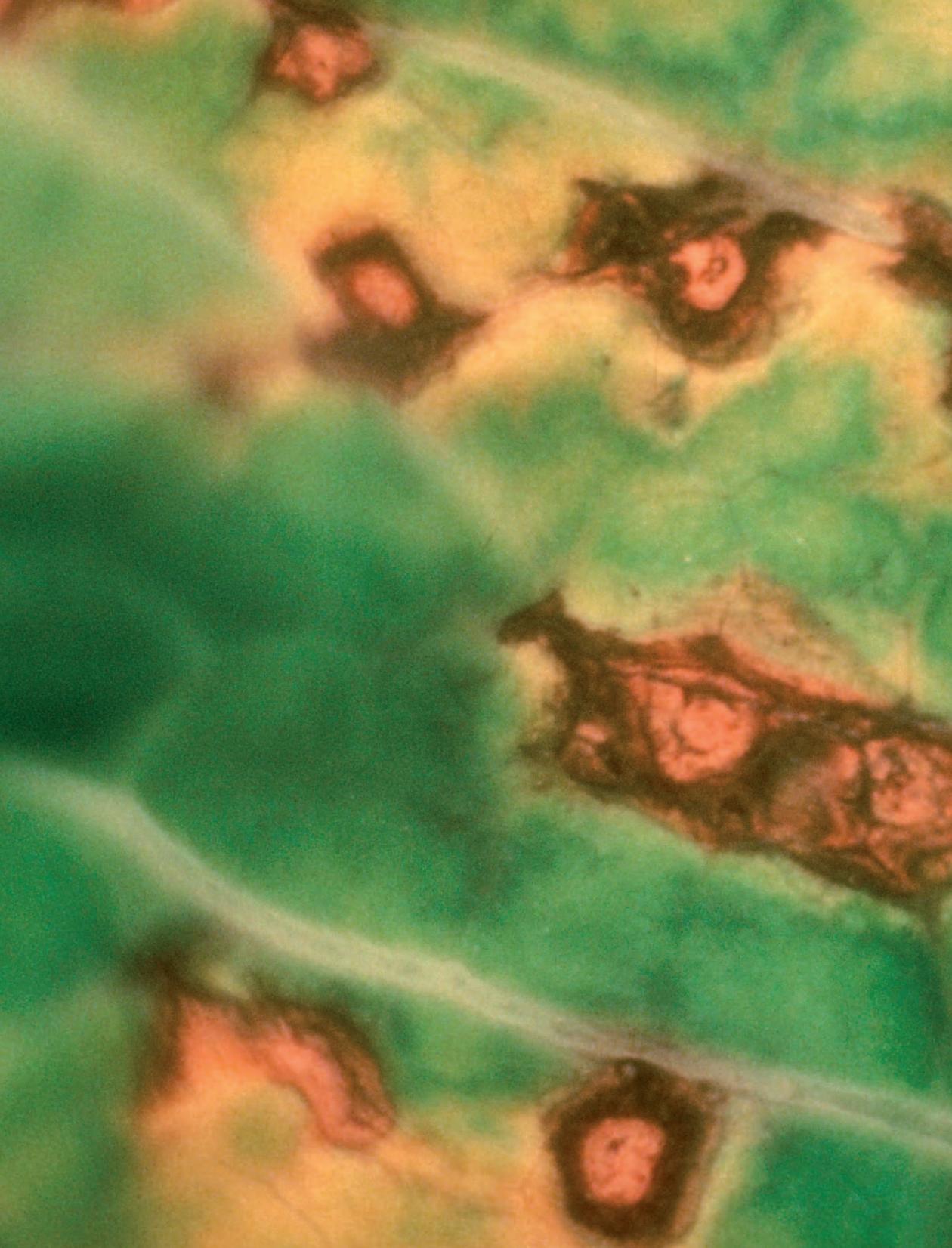
Comment gérer le risque lié aux mycotoxines ? 105

■ Comment avoir moins de mycotoxines dans les aliments ?	107
■ En cent ans, moins de dix épidémies	109
■ Le cancer, le risque insidieux des petites doses.....	109
■ Danger et risque, deux notions à ne pas confondre	110
■ Manger à moindre risque.....	112
■ Manger bio est-il indemne de tout risque ?	117
■ Peut-on se nourrir sans risque ?.....	118
■ Comment limiter l'exposition aux mycotoxines via la voie alimentaire ?	120
■ Le risque zéro existe-t-il ?	126

Comment vivre au quotidien avec les mycotoxines ? 129

■ Un danger avéré pour la santé publique	131
■ Un impact économique pernicieux	133
■ Sauver une vie tous les deux ans, est-ce suffisant ?	136
■ Des règles plus strictes... pour des produits plus sains	141
■ La filière à la loupe	143
■ Mieux vaut prévenir que guérir	147
■ Continuer le combat après la récolte	154
■ Comment se débarrasser des mycotoxines ?	157
■ Quelles mesures pour la santé humaine ?	169
■ Une arme pour le bioterrorisme ?	174
■ Changement climatique et mycotoxines	175
■ Vers un management intégré et mondial de ce fléau	176
■ Les mycotoxines au quotidien	179

Bibliographie	180
Crédits photographiques	182



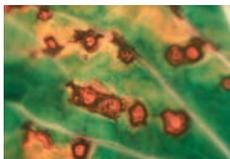
A microscopic image of plant tissue, likely a leaf, showing several large, green, polygonal cells. The cells are separated by thin, light-colored cell walls. Several cells contain prominent, dark brown, circular spots, which are characteristic of mold or fungal infection. The overall image is slightly blurred, emphasizing the texture and color of the plant cells.

Moisissures et mycotoxines



Moisissures et mycotoxines

L'automne approche et les pommiers ploient. Les pommes jaunes, vertes ou rouges sont mûres à point. Elles attendent d'être cueillies puis pressées pour donner jus et compotes. La combinaison des variétés de pommes douces, amères ou acides produira un jus caractéristique d'un terroir ou d'une ferme. Ramassées à pleine maturité, les pommes sont gorgées de sucre et d'arômes. D'aucuns seraient tentés d'y adjoindre ces pommes tavelées et tombées au sol. Une fois écrasées et le jus filtré, l'effet sur la couleur ou le goût serait si peu perceptible! Oui, mais... les meurtrissures portées par ces fruits sont une porte d'entrée aux moisissures. Elles y pénètrent, s'y développent en mortifiant et brunissant davantage la pulpe... et puis? Si la proportion de fruits avariés est importante, la qualité gustative et nutritionnelle du jus extrait pourrait bien sûr en être affectée. Et après? Eh bien, s'il se trouve que la moisissure est un *Penicillium expansum*, alors un autre danger guette. Il inquiète d'ailleurs suffisamment les autorités pour qu'elles enjoignent les fabricants à respecter les guides de bonnes pratiques professionnelles. Des analyses officielles sont organisées chaque année pour contrôler la qualité sanitaire des jus et compotes avant leur commercialisation.



■ Page précédente

Les *Alternaria*, ici attaquant des feuilles, sont des moisissures que l'on trouve communément sur des déchets alimentaires.



■ Des moisissures sur nos aliments

Ce danger, quel est-il ? Certaines moisissures sont capables de produire des toxines et de les diffuser dans leur environnement. Ce phénomène s'appelle la toxinogénèse. Ces molécules sont de petite taille, en général de poids inférieur à 1000 daltons (environ dix fois un acide aminé). Ce sont des structures chimiques toxiques pour d'autres espèces vivantes. On suppose que les moisissures les utilisent pour lutter contre des espèces concurrentes. Ces substances sont appelées **mycotoxines**, mot formé à partir de *mycos*, qui veut dire champignon en grec, et de *toxicum*, poison. Dans notre cas, *P. expansum* élabore une mycotoxine nommée **patuline**. Cette mycotoxine possède des propriétés antibactériennes et antifongiques qui aideraient la moisissure dans sa lutte pour la survie vis-à-vis de ses congénères. Par cette action, la mycotoxine se rapproche d'un antibiotique ! De fait, dans les années cinquante, la patuline a été utilisée avec succès pour traiter la brucellose bovine ainsi que rhumes et bronchites chez l'homme. Mais, à l'usage, elle s'est révélée neurotoxique. Depuis, elle n'est plus destinée à des fins thérapeutiques chez l'homme et a été irrémédiablement reclassée parmi les mycotoxines.

Les mycotoxines sont très résistantes à la chaleur, au froid, à l'oxydation et à l'acidité. Il existe peu de remèdes pour les éliminer. Dans l'exemple de la patuline, la filtration des jus et extraits de pomme diminue tout de même la quantité de toxines. Il en est de même pour le procédé de fermentation du cidre. De fait, les cidres sont en général beaucoup moins contaminés que les jus de pomme. Cependant, les mycotoxines sont très actives, y compris à très faible dose. Aussi, même présentes à l'état de traces, c'est-à-dire inférieures au centième de milligramme par litre de jus ou par kilogramme d'aliment, elles



Les pommes peuvent être attaquées par des moisissures productrices de patuline, une mycotoxine.



Les moisissures pénètrent dans le fruit à l'occasion de blessures occasionnées par des insectes comme le carpocapse, un papillon qui pond ses œufs sur le fruit où s'installeront ensuite les larves.



peuvent être nocives pour l'homme. La patuline agit sur le système nerveux provoquant agitation ou convulsion. Elle est, de plus, responsable de désordres gastriques ou intestinaux.

Toutes les moisissures ne sont pas dangereuses

Une moisissure, qu'est-ce que c'est ? Un champignon microscopique pluricellulaire. Comme tous les champignons, les moisissures sont des organismes euca-

Une vie de moisissure

Les moisissures sont des champignons microscopiques. Ce sont des micro-organismes pluricellulaires filamenteux dont la paroi est riche en cellulose et en chitine. La structure élémentaire est appelée hyphe (filament mycélien) et l'ensemble des hyphes forment le mycélium ou thalle pluricellulaire. La multiplication des moisissures peut se réaliser par voie sexuée ou asexuée :

- le cycle sexué se manifeste par la fusion des cellules germinales qui, après méiose, produisent des ascospores. Celles-ci germineront et formeront à nouveau un mycélium ;
- le cycle asexué où les extrémités du mycélium s'individualisent en spores (appelées conidies chez les *Penicillium*). Elles sont disséminées par l'air. Elles se déposent sur un substrat favorable (humidité, chaleur), germent et bourgeonnent dans toutes les directions en formant des hyphes dont l'ensemble reconstituera un mycélium. Cette voie de reproduction est très productive puisqu'il a été estimé qu'une seule spore germinant à température ambiante pouvait engendrer plusieurs millions de spores en vingt-quatre heures !

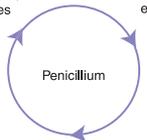
Le cycle reproductif asexué des moisissures



À partir du mycélium, des conidiophores se forment



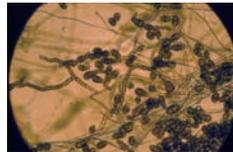
Les conidiophores bourgeonnent en conidies (spores)



Les conidies se détachent et développent un nouveau mycélium



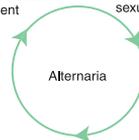
Le cycle reproductif sexué des moisissures



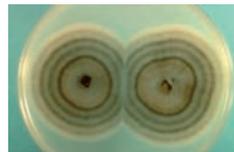
À partir du mycélium, des cellules sexuées se forment



Après fusion cellulaire des cellules sexuées, les spores entament une germination



Les nouvelles cellules reforment un mycélium



Toxines de moisissures contre toxines d'amanite

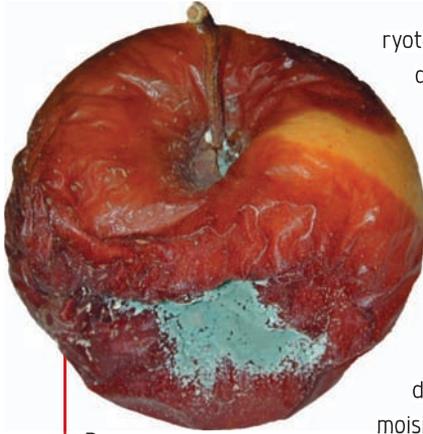
On réserve le terme de mycotoxines aux toxines produites par les moisissures. Ces champignons dits « inférieurs » peuplent l'air ambiant et se posent sur divers substrats organiques surtout s'ils sont riches en eau (déchets alimentaires, papiers et bois humides). Ils sont microscopiques mais on peut voir à l'œil nu leur mycélium. Par opposition, nos champignons des bois ou des prés (girolles, chanterelles, bolets, etc.) poussent sur des sols très riches en humus, comme en forêt ou dans certaines prairies. Certains de ces champignons non comestibles, tels que les amanites, renferment des toxines pouvant être mortelles. Celles-ci provoquent une intoxication directe et brutale par ingestion d'un champignon que le ramasseur n'aura pas su distinguer des champignons comestibles.

Le bolet (*Suillus*) est un champignon parfaitement comestible.



Les amanites (ici *Amanita muscaria*) sont des champignons de nos forêts très toxiques pour le consommateur imprudent ! L'amanite phalloïde est même mortelle en quelques heures.





Pomme contaminée par *P. expansum*.

ryotes. Les cellules présentent un noyau constitué de chromosomes, ce qui les distingue des organismes procaryotes comme les bactéries.

Elles sont saprophytes et se développent sur des matériaux inertes très variés (papier, bois, aliments). Elles forment un mycélium, sorte de petit « tapis » visible à l'œil nu, d'aspect feutré, plus ou moins concentrique et coloré. Le mycélium est composé de filaments, les hyphes, permettant à la moisissure de coloniser le substrat sur lequel elles se trouvent et de s'en nourrir. Pour se reproduire, le mycélium « bourgeonne » par endroit formant des spores de quelques micromètres (μm) de diamètre. Les spores contiennent l'information génétique de la moisissure. Elles se détachent du mycélium et se dispersent dans l'air ambiant jusqu'à s'immobiliser sur un autre substrat propice à un nouveau départ. Les spores bien protégées par une paroi épaisse ont un contenu en eau très faible et un métabolisme réduit. Elles peuvent incidemment renfermer des mycotoxines. Les spores peuvent survivre des mois, voire des années, avant de fructifier à nouveau. On a prétendu en découvrir dans les tombeaux égyptiens !

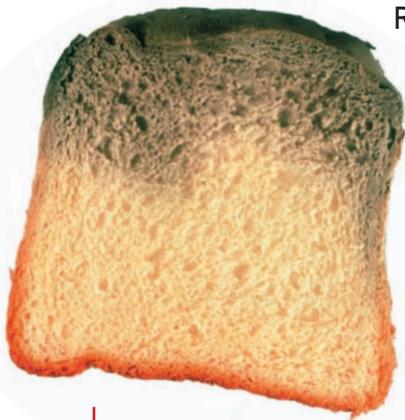
Reconnaître les moisissures suspectes

Les moisissures se diversifient en plusieurs dizaines de milliers d'espèces mais très peu d'entre elles contaminent la nourriture de l'homme. Les moisissures produisant des mycotoxines sur les aliments ressortent principalement des genres *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus* et *Claviceps*, bien qu'il faille préciser que beaucoup d'espèces appartenant à ces mêmes genres ne sont pas dangereuses. Une moisissure est capable de produire une ou plusieurs sortes de mycotoxines. Inversement, une mycotoxine peut être élaborée par différentes espèces de moisissures. Tout aliment moisi ne renferme pas obligatoirement des toxines. Il ne faut donc pas s'affoler lorsque l'on voit de la moisissure sur un aliment !

Néanmoins, en cas d'atteinte massive, la valeur nutritionnelle de l'aliment est diminuée car les moisissures dégradent une bonne partie des nutriments pour leur propre consommation. Naturellement, la vue de moisissures réveille le consommateur, d'autant que le goût, parfois l'odeur ou la consistance vont être plus ou moins incommodes. En général, l'être humain rejette la consommation d'aliments moisissus. Cela réduit d'autant le risque d'ingérer des mycotoxines !

En revanche, un animal ne fera pas forcément la différence. Des cas d'intoxications d'animaux d'élevage ou domestiques (chiens) ne sont pas si rares après consommation d'aliments moisissus et/ou porteurs de mycotoxines.

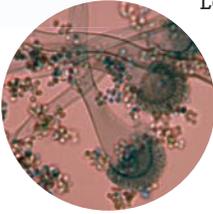
Les aliments conservés dans de mauvaises conditions ou au-delà de la date limite qui leur est assignée sont de bons substrats pour les moisissures de l'air ambiant qui s'y déposent volontiers.





Aspergillus, *Penicillium*, *Fusarium* et *Claviceps*, quatre familles de moisissures élues au royaume des mycotoxines

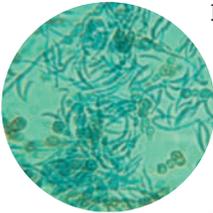
Les moisissures produisant des mycotoxines appartiennent principalement à quatre genres : les *Aspergillus*, les *Penicillium*, les *Fusarium* et les *Claviceps*.



Les *Aspergillus* croissent plutôt en milieu chaud et humide, comme dans les zones tropicales de la planète. Lorsqu'elles colonisent des cultures d'oléagineux (maïs, arachides, noix, amandes, pistaches) ou de céréales, les *Aspergillus* élaborent des aflatoxines, des ochratoxines, de la stérigmatocystine... Les spores sont formées dans une zone caractéristique de cette moisissure apparaissant comme une chevelure ou une pomme d'arrosoir plus ou moins arrondie, de couleur verte, brune ou noire.



Les *Penicillium* se développent dans une large gamme de température. Ils sont des contaminants usuels en zone de climat tempéré, voire froid et humide. On les retrouve facilement dans nos réfrigérateurs, par exemple sur des restes alimentaires. Au microscope, la partie de la moisissure produisant les spores ressemble à un ensemble de chaînes verdâtres figurant un pinneau.



Les *Fusarium* sont les moisissures les plus répandues dans le monde et ils fréquentent tous les sols. Les céréales sont très souvent victimes de leurs attaques. Leurs spores sont fusiformes (d'où leur nom de *Fusarium*) et leurs colonies sont d'aspect blanchâtre à rosé.



Les *Claviceps* colonisent en particulier les inflorescences de graminées et s'y installent en provoquant la formation d'un petit saccule sur les épis, appelé ergot. Les spores des *Claviceps* sont regroupées dans des capitules, zones arrondies au bout des tubes germinaux. Le cas est bien connu pour le seigle, constituant la maladie de l'«ergot de seigle» responsable des terribles endémies qui ont frappé au Moyen Âge en Europe. Des milliers de personnes ayant consommé du pain fabriqué avec de la farine de seigle contaminée par ces *Claviceps* étaient atteintes d'ergotismes gangréneux ou hallucinatoires. Les *Claviceps* sont des hôtes courants de plantes colonisant les zones de marécage et, d'une manière générale, les prairies humides et ombragées.

■ Premier rendez-vous avec les moisissures

Les moisissures se déposent et se fixent sur des substrats à partir de l'air ambiant. Ainsi, des restes alimentaires non protégés permettent aux moisissures de s'installer et de s'y développer. Un défaut de stérilisation peut aussi favoriser l'apparition de moisissures, comme on peut parfois l'observer sur des confitures familiales. Heureusement sans conséquence, car les moisissures qui se complaisent en surface des confitures sont rarement toxigènes ! La confiture très concentrée en sucre constitue un milieu peu propice à la production de toxines. Ce qui est davantage pernicieux et pose un problème de santé publique, c'est que, à l'inverse, un aliment d'apparence parfaitement saine peut renfermer des mycotoxines. En effet, la contamination survient sur les cultures au champ, ou bien au moment de la récolte, ou du stockage, des céréales et des fruits. Une rencontre avec des moisissures toxigènes est le point de départ de toute contamination de ces denrées et de tous les produits fabriqués à partir de celles-ci. Les moisissures peuvent être écartées par des opérations de lavage et de nettoyage, ou par des traitements chimiques ou biologiques. Mais les mycotoxines, une fois produites, restent présentes ! En effet, ces toxines sont en général très résistantes et elles restent « accrochées » de façon invisible à la denrée et l'accompagnent jusqu'à l'élaboration de l'aliment fini.



L'étape d'affinage traditionnel des saucissons comprend une mise en contact avec des *Penicillium* qui feront apparaître une couche blanchâtre à la surface du boyau appelée « fleur ».

■ Des auxiliaires technologiques pourtant indispensables

Depuis des siècles et dans nombre de civilisations, les moisissures représentent de précieux auxiliaires culinaires. Elles concourent au développement des caractéristiques organoleptiques (affinage) de nombreux produits traditionnels en agissant sur les protéines et les matières grasses de ces aliments. Les moisissures modulent certaines activités enzymatiques qui favorisent l'exhalaison d'un grand nombre de composés aromatiques. Un goût ou une odeur caractéristique se développe et la sapidité de certaines substances formées au cours de l'affinage est masquée. Ainsi, elles contribuent à la flaveur de certains de nos produits de terroir comme les produits de salaison.

Les fromages à croûte fleurie sont couverts d'un tapis de moisissures du genre *Penicillium*. Ainsi *P. camemberti* compose le feutrage superficiel du camembert. Les fromages à pâtes dites persillées doivent leur aspect veiné et

Raisin moisi pour millésime !

La pourriture noble des grains de raisins est due à la moisissure *Botrytis cinerea* qui ne produit pas de mycotoxines. Elle agit en concentrant les sucres et les arômes, ce qui donne des vins liquoreux tels que les renommés sauternes ou montbazillac, ou encore les vins de vendanges tardives d'Alsace (riesling).

bleuté, et leur flaveur, à *P. roqueforti* (roquefort). D'autres moisissures sont impliquées, comme *Geotrichum candidum*, responsable de l'aspect en peau de crapaud des fromages de chèvre. Le saucisson est une charcuterie crue, fermentée et séchée. Préparé suivant les recettes traditionnelles, les propriétés sensorielles du saucisson (goût, odeur, arôme, couleur, texture) découlent directement des activités métaboliques de la flore microbienne qui l'enveloppe. Au cours du séchage, le saucisson durcit et la surface du boyau se recouvre de moisissures claires formant une couche poudreuse blanche, joliment dénommée « fleur », qui témoigne d'une bonne maturation. Les moisissures en surface, par exemple *P. jensenii* ou *P. nalfiogensis*, protègent l'aliment contre l'oxygène, la lumière et l'excès de dessiccation. Elles participent au développement continu des arômes au cours de l'affinage du saucisson. En Chine, la sauce de soja se prépare depuis des siècles par fermentation d'un mélange de graines de soja et de céréales torrifiées, après ensemencement de la mixture par la moisissure *Aspergillus oryzae*. Celle-ci lui procure un arôme puissant et lui donne sa couleur noire, brun-rougeâtre.



Les moisissures sont utilisées depuis des temps immémoriaux pour fabriquer ou affiner certains produits du terroir. On aperçoit ici l'aspect en « peau de crapaud » d'un fromage de chèvre dû à *Geotrichum*.

Bien choisir sa moisissure

Les procédés d'ensemencement de ces fabrications peuvent être « naturels » ou provoqués. Par exemple, certains fromages ou certaines salaisons sont maintenus dans un lieu ou une enceinte (cave, grenier, atelier) dont l'atmosphère stabilisée répond à des paramètres singuliers, notamment d'humidité et d'oxygénation. Elle est en général saturée en spores de la moisissure d'intérêt. La moisissure se dépose sur les produits frais nouvellement entreposés et participe à leur affinage en quelques jours à plusieurs mois, voire plusieurs années ! Pour les fromages à croûte lavée, le brossage intermittent de celle-ci introduit des moisissures leur conférant une flaveur typique. Dans les procédés technologiques modernes, une étape d'ensemencement volontaire est parfois pratiquée.

Bien entendu, pour gagner leur galon d'auxiliaire technologique, les moisissures ont été rigoureusement vérifiées et sélectionnées pour leur incapacité à produire des mycotoxines, du moins dans les conditions de leur emploi. L'espèce *P. roqueforti* comprend des souches capables de synthétiser une mycotoxine, d'ailleurs baptisée « roquefortine », mais pas les souches utilisées en fromagerie ! S'il arrive que des mycotoxines, comme la PR-toxine ou la patuline, soient produites dans un fromage persillé, elles sont rapidement dégradées par action enzymatique devenant ainsi inoffensives.

Une barrière constituée d'un tapis de moisissures bénignes (non toxogènes) sur un aliment peut constituer un effet protecteur. Ce tapis ou cette croûte de moisissures participe mécaniquement à la conservation de certains aliments affinés. Ils font barrage à l'installation d'autres micro-organismes dangereux (flore pathogène, notamment bactérienne) ou nuisant à la bonne conservation du produit (flore d'altération).

Parfois des mets de choix

Au temps des Aztèques, on ne faisait pas la fine bouche devant le « cuitlacoche », ou « huitlacoche », littéralement « crottes de corbeau » ! Il s'agit de champignons se développant sur les épis de maïs en formant des grosseurs de 1 à 10 centimètres remplies de spores. C'est en fait une maladie du maïs, un « charbon » dû à la moisissure *Ustilago maydis*. Appelé « truffe mexicaine » ou « caviar aztèque », le cuitlacoche était très apprécié à l'époque. Il est encore consommé au Mexique, cuisiné au beurre ou à l'huile. Pour ceux qui l'ont goûté, le cuitlacoche a une saveur sucrée, vanillée et caractéristique du sirop d'érable. C'est un ingrédient culinaire riche en glucides, en lipides (acides oléique et linoléique), en protéines et en vitamines. Cependant, la question de sa toxicité reste posée. Cette moisissure produit tout de même des métabolites secondaires comme l'ustilagine. Cet alcaloïde aurait des effets similaires à l'ergotamine, une mycotoxine neurotoxique élaborée par *Claviceps purpurea*.

L'ensemencement des fromages s'effectue dans des enceintes dont l'atmosphère est saturée par les moisissures d'intérêt. L'affinage en cave bénéficie des conditions d'humidité et de température laissant ces moisissures poursuivre leur œuvre de maturation grâce à leur équipement enzymatique.

■ Pourquoi les moisissures fabriquent-elles des mycotoxines ?

On ne le sait pas vraiment. Souvent, les moisissures sécrètent des mycotoxines quand elles sont en état de stress. Par exemple, lorsqu'elles sont en compétition avec d'autres micro-organismes pour coloniser un substrat. La plupart des mycotoxines ont des propriétés toxiques envers les moisissures ou les bactéries. C'est là l'origine de nos antibiotiques, comme la pénicilline !