

A microscopic image of plant tissue, likely a leaf, showing several brown, necrotic lesions. The tissue is green, and the lesions are dark brown, indicating damage caused by fungi or other pathogens. The lesions are irregular in shape and size, and some show a distinct border.

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

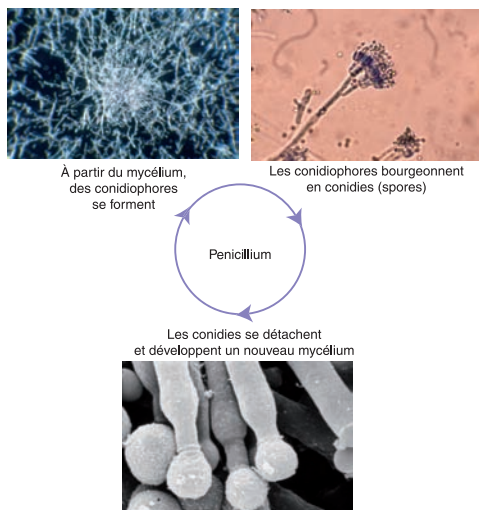
Une moisissure, qu'est-ce que c'est ? Un champignon microscopique pluricellulaire. Comme tous les champignons, les moisissures sont des organismes eucaryotes.

Une vie de moisissure

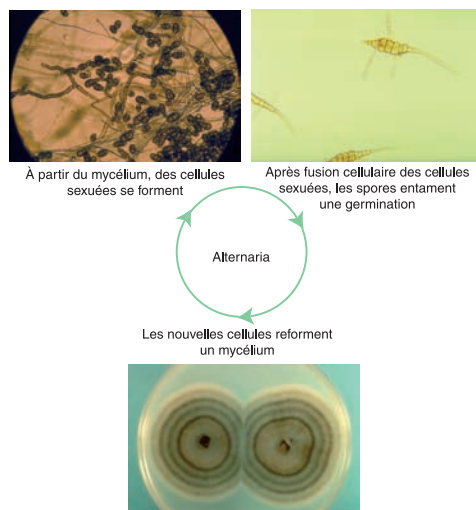
Les moisissures sont des champignons microscopiques. Ce sont des micro-organismes pluricellulaires filamenteux dont la paroi est riche en cellulose et en chitine. La structure élémentaire est appelée hyphe (filament mycélien) et l'ensemble des hyphes forment le mycélium ou thalle pluricellulaire. La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



Le cycle reproductif sexué des moisissures



Toxines de moisissures contre toxines d'amanite

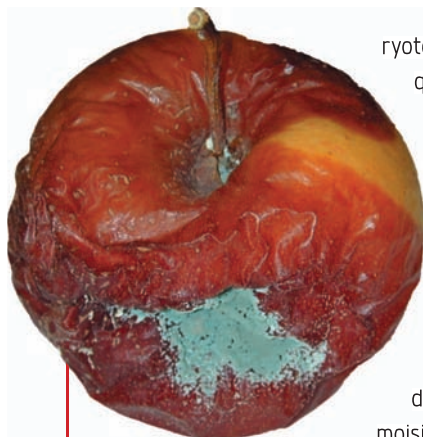
On réserve le terme de mycotoxines aux toxines produites par les moisissures. Ces champignons dits « inférieurs » peuplent l'air ambiant et se posent sur divers substrats organiques surtout s'ils sont riches en eau (déchets alimentaires, papiers et bois humides). Ils sont microscopiques mais on peut 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

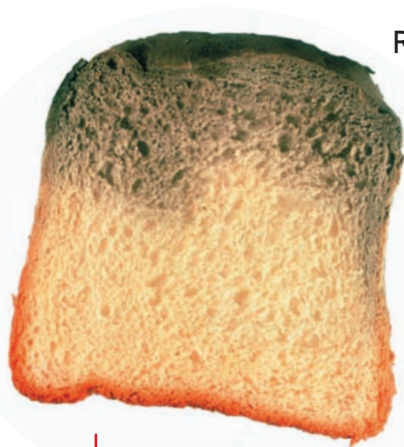
ambiant jusqu'à s'immobiliser sur un autre substrat propice à un nouveau départ. Les spores bien protégées par une paroi épaisse ont un contenu en eau très faible et un métabolisme réduit. Elles peuvent incidemment renfermer des mycotoxines. Les spores peuvent survivre des mois, voire des années, avant 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 révolse 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 moisies. 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 moisies et/ou porteurs de mycotoxines.

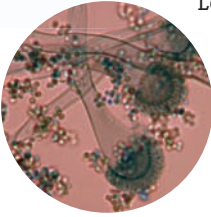


Les aliments conservés dans de mauvaises conditions ou au-delà de la date limite qui leur est assignée sont de bons substrats pour les moisissures de l'air ambiant qui s'y déposent volontiers.

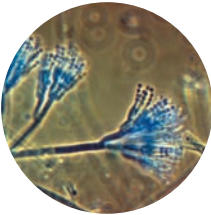


***Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* et *Claviceps*, quatre familles de moisissures élues au royaume des mycotoxines**

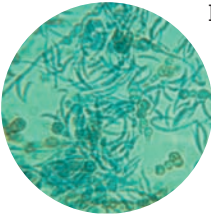
Les moisissures produisant des mycotoxines appartiennent principalement à quatre genres : les *Aspergillus*, les *Penicillium*, les *Fusarium* et les *Claviceps*.



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 peigne.



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 torréfiées, 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*. Appelée « 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*.

■ 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 !

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.



Certaines mycotoxines ont été exploitées comme des antibiotiques, mais elles ne sont plus utilisées en raison de la difficulté à contrôler leur synthèse et à les produire à grande échelle. De nos jours, on préfère les fabriquer par voie de synthèse. Cela permet aussi de proposer des modifications de leur structure chimique afin de les rendre plus efficaces. D'autres mycotoxines, comme la patuline ou la griséofulvine, ont été retirées de la pharmacopée en raison d'effets secondaires toxiques.

Les mycotoxines sont issues du métabolisme dit « secondaire » de la moisissure par opposition au métabolisme dit « primaire ». Ce dernier préside à l'édification de l'organisme par synthèse de ses éléments constitutifs : protéines, lipides et glucides. Le rôle du métabolisme secondaire est encore largement inconnu. Il est principalement activé chez la moisissure lorsqu'elle est soumise à une sécheresse excessive, à des températures extrêmes ou bien sous l'action de certains fongicides. Lorsqu'elle est en présence d'autres micro-organismes, la moisissure produit et diffuse des mycotoxines à visée bactéricide ou fongicide pour dégager son espace de survie : c'est la compétition interespèces.

Le métabolisme des moisissures est ainsi orienté par un défaut de nutriments ou d'oxygène, des variations de température ou d'humidité, ou la combinaison de ces paramètres. Il favorise la production de molécules-déchets ou au contraire de molécules de défense comme les mycotoxines. Dans un silo de stockage des céréales, la raréfaction de l'oxygène combinée à la pression et à la chaleur



Le « champignon de maïs » est un mets délicat, un caviar pour les papilles mexicaines ! D'origine aztèque, le cuiltlacoche se consomme froid en salade ou chaud dans un taco.

De la pénicilline dans du moisi !

Au cours du ^{xix}^e siècle, plusieurs biologistes ont observé l'action bactéricide des moisissures, en particulier des *Penicillium*. Avant Fleming, Pasteur avait noté l'inhibition de croissance du bacille du charbon en présence de moisissures. En 1928, à son retour de vacances à son laboratoire de Saint Mary's Hospital, situé à Londres, A. Fleming observe que les boîtes de Petri qu'il conservait, et dans lesquelles il faisait culture de staphylocoques, étaient contaminées par *P. notatum*. Ce *Penicillium* était étudié dans le même laboratoire par l'un de ses collègues. À proximité des mycéliums de *P. notatum*, les staphylocoques ne poussaient plus. Il supposa que les *Penicillium* produisaient une substance antibactérienne qui s'était diffusée dans la gélose. Il baptise cette substance « pénicilline ». Il faudra attendre la seconde guerre mondiale pour identifier, purifier et produire en grande quantité cet antibiotique à partir d'une culture de *Penicillium chrysogenum* isolé à partir d'un melon moisi. Par la suite, la fabrication de cet antibiotique et d'un certain nombre de ses variantes sera semi-synthétique puis synthétique. Cela permet d'éviter les impuretés et les principaux effets secondaires qu'engendrent les préparations naturelles extraites des *Penicillium*.

Le roquefort à la rescousse de la médecine

Le roquefort a été utilisé naguère pour ses effets antibactériens contenus dans le champignon bleu qu'il renferme, le *P. roqueforti*. Ce champignon est un *Penicillium* de la même famille que celui synthétisant la pénicilline. Le fromage fut involontairement inventé par un berger du Causse dans des circonstances analogues à celles de la découverte de Fleming. Les bergers traitaient avec du roquefort les plaies infectées afin de prévenir la gangrène. Ils furent même poursuivis pour pratique illégale de la médecine. Leur méthode a été taxée de charlatanisme, jusqu'au jour où l'usage de la pénicilline fut consacré par la communauté scientifique.

Du pain pour soigner nos ancêtres

Il existe des documents indiquant que, dans l'Antiquité, pour soigner des infections, les Égyptiens et les Romains utilisaient des champignons se développant sur le pain. Il y a 3 000 ans, les Chinois semblent avoir utilisé des graines de soja envahies par des moisissures pour traiter des infections cutanées. Il est permis de supposer que ces moisissures produisaient des toxines à effets antibactériens.

dégagée par l'amoncellement des grains induit certains *Penicillium* ou *Aspergillus* à produire de l'ochratoxine, d'où son surnom de « mycotoxine de stockage ». Au contraire, la production par des *Penicillium* de mycotoxines comme la patuline et l'acide pénicillique décroît considérablement dans une atmosphère pauvre en oxygène.

■ Les moisissures adorent l'humidité

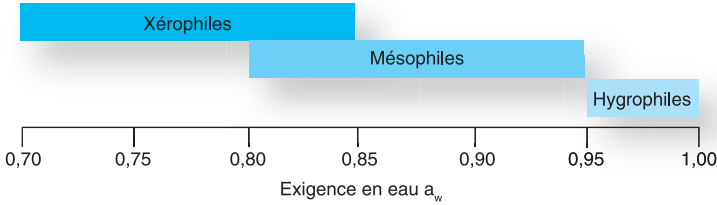
Les moisissures ne croissent sur un substrat que s'il contient assez d'eau et que l'humidité environnante est suffisante. Quelques espèces de moisissures peuvent apparaître sur des substrats dès 65–70 % d'humidité, mais la plupart des moisissures raffolent d'une atmosphère plus humide, comprenant de 80 à 90 % d'humidité. C'est une condition importante pour qu'une moisissure s'installe sur un substrat puis se développe. On parle d'« activité de l'eau » caractérisée par le facteur A_w . Ainsi, d'une manière générale, plus un aliment aura une A_w proche de 1, plus il sera sensible aux altérations par les moisissures. Mais les moisissures les plus dangereuses, en dehors des *Fusarium*, sont souvent xérotolérantes, c'est-à-dire qu'elles supportent aussi les atmosphères sèches.

Les moisissures acceptent bien les variations de pH (acidité). Elles déploient un optimum de croissance pour un pH généralement compris entre 4 et 6,5. Mais elles ne dédaignent pas croître en milieu acide et sont plus tolérantes que bien des bactéries. Une gamme de pH comprise entre 3 et 8 ne leur disconvient pas. D'ailleurs, de nombreux aliments au pH inférieur à 6, comme les légumes, les fruits et la viande, sont plus sensibles aux moisissures qu'aux bactéries.

Les moisissures ont aussi besoin d'oxygène et de nutriments. Les moins gourmandes en oxygène sont capables de croître à l'intérieur du substrat. C'est



Tolérance des moisissures à l'humidité



Les espèces fongiques ont des comportements variés selon la disponibilité en eau : elles peuvent être regroupées en espèces **hygrophiles** préférant les milieux très humides (*A. restrictus*), en espèces **mésophiles** ayant une affinité pour l'eau mais sans excès (*A. ochraceus*, *A. flavus*) et en espèces **xérophiles** qui ont une préférence pour les milieux légèrement humides voire secs (*Fusarium*).

ainsi que *P. roqueforti* est à son aise au sein des fromages, lesquels deviennent bleus par accumulation des pigments contenus dans cette moisissure. *Byssoclamys nivea*, producteur de patuline, se complait quant à lui dans les jus de fruits. Certaines moisissures parviennent à se développer au sein de substrats où la teneur en oxygène est jusqu'à dix fois inférieure à celle de l'atmosphère. Quelques-unes, comme *B. nivea* et *B. fulva*, peuvent même se contenter d'une atmosphère à 0,27 % d'oxygène. C'est dire que les denrées alimentaires préparées dans une ambiance pauvre en oxygène ne sont pas non plus à l'abri des moisissures.

Selon les espèces, les moisissures sont diversement tolérantes à la température, à l'humidité et au pH. En général, elles affectionnent des températures comprises entre 15 et 30 °C. Certaines préfèrent des températures basses, en particulier aux alentours de 4–8 °C, et les voilà présentes dans les enceintes réfrigérées. Les *Penicillium* sont ainsi des hôtes familiers de nos réfrigérateurs !

À chaque espèce de moisissures correspond un profil « oxygène-température-humidité » optimal pour sa croissance. Mais ce profil est souvent légèrement décalé pour l'activité de toxinogenèse. Ce n'est pas quand la moisissure est au mieux qu'elle produit ses toxines mais lorsqu'elle est en état de stress !



Les moisissures peuvent avoir une préférence « alimentaire » : ainsi, *Penicillium digitatum* préfère le citron.



Grappe de raisin atteinte par *Botrytis cinerea*, le champignon responsable de la pourriture grise de la vigne.

Le repas des moisissures

Pour se nourrir, les moisissures doivent puiser de la matière organique assimilable dans leur milieu environnant. La paroi rigide entourant les cellules fongiques empêche toute absorption par phagocytose. Seuls des nutriments simples et solubles peuvent passer à travers leur paroi. Les moisissures produisent et diffusent des enzymes capables d'hydrolyser les macromolécules du substrat sur lequel elles s'installent. Un arsenal chimique exceptionnel formé d'acides et d'enzymes variés leur permet de s'apprêter une soupe de nutriments assimilables. Il en faut tellement peu aux moisissures pour se développer que n'importe quel substrat organique leur convient : fruits,

légumes, céréales, oléagineux, huiles, viande, papier, bois, plâtre...

Certaines moisissures ont des exigences très spécifiques et ne peuvent croître que sur un seul hôte. Voici *P. expansum* qui se régale de la pomme, alors que *P. digitatum* préfère le citron et *Phytophthora infestans* la pomme de terre. Un substrat comme la paille nécessite pour la dégrader des enzymes cellulolytiques dont certaines moisissures sont équipées. C'est le cas de *Stachybotris atra* produisant les stachybotriotoxines, une classe particulière de mycotoxines générant des intoxications graves chez les ruminants, les chevaux en particulier.



Le mildiou de la pomme de terre est une maladie ravageuse due à la moisissure *Phytophthora infestans*.

Des moisissures presque partout

Les moisissures toxigènes peuvent se trouver sous tous les climats et sur tous les substrats s'ils contiennent des nutriments et de l'eau. Certains produits alimentaires sont plus vulnérables que d'autres, surtout les graines oléagineuses comme les arachides, le café et le cacao, mais aussi le maïs, les céréales et leurs produits dérivés, les fruits et leur jus (fermenté ou non), le cidre, le vin, la bière et les épices. Des céréales contaminées peuvent être ingérées par un animal et leurs organes être atteints par des mycotoxines. C'est ainsi que des denrées comme le lait ou les abats (foie, rognons) peuvent renfermer des quantités décelables en mycotoxines.

Dans les cultures, certaines moisissures peuvent contaminer les plantes avant la récolte alors que d'autres se développent surtout



lors de la période de stockage. Les *Fusarium*, très répandus dans les sols, ont des besoins en eau assez importants et ils fréquentent surtout les cultures au champ. Ce n'est pas le cas de *Penicillium* et d'*Aspergillus* qui croissent plutôt sur les denrées stockées.

Les *Aspergillus* se développent particulièrement bien sur les cultures des zones tropicales où alternent sécheresse et humidité. Les mycotoxines produites peuvent altérer des cultures comme les arachides, le café ou le cacao. Les *Penicillium* préfèrent les régions plus fraîches et humides comme le nord de l'Europe. Ils contaminent les céréales comme le blé, et particulièrement celles cultivées sous des latitudes plus nordiques comme le seigle ou le sarrasin.



La cloque du pêcher est une maladie assez commune d'arbres fruitiers, en particulier du pêcher, qui résulte de l'attaque de *Taphrina deformans*.

Moississures, climats, denrées alimentaires et mycotoxines

Moississures	Climats de prédilection	Mycotoxines types	Denrées touchées
<i>Aspergillus</i>	Tropical ou atmosphère chaude et humide	Aflatoxines	Oléagineux (arachides, pistaches, figues, épices, maïs, sorgho)
<i>Penicillium</i> et <i>Fusarium</i>	Tempéré ou atmosphère fraîche et humide	Ochratoxine Fumonisines Trichothécènes	Céréales (blé, orge...)
<i>Fusarium</i>	Tempérés et/ou chauds	Zéaralénone DON Toxines T-2/HT-2 Autres trichothécènes	Maïs Céréales (blé, orge, avoine) Riz

Les blessures occasionnées au niveau des grains ou des fruits par des insectes ou des rongeurs facilitent la pénétration des moisissures. Si peu de précautions sont prises lors de la récolte, du transport et du stockage, des chocs physiques engendrant des meurtrissures sont autant de portes ouvertes à l'installation des moisissures sur la denrée.

De nombreuses moisissures provoquent des maladies dites « cryptogamiques » chez les végétaux, mais toutes ne produisent pas de mycotoxines ! Les récoltes peuvent en pâtir si les cultures ne sont pas traitées par des fongicides. Ainsi, le mildiou est provoqué par une moisissure s'attaquant aux pommes de terre (*Phytophthora infestans*) ou à la vigne (*Plasmopara viticola*). *Taphrina deformans* est l'agent de la cloque du pêcher. Les rouilles

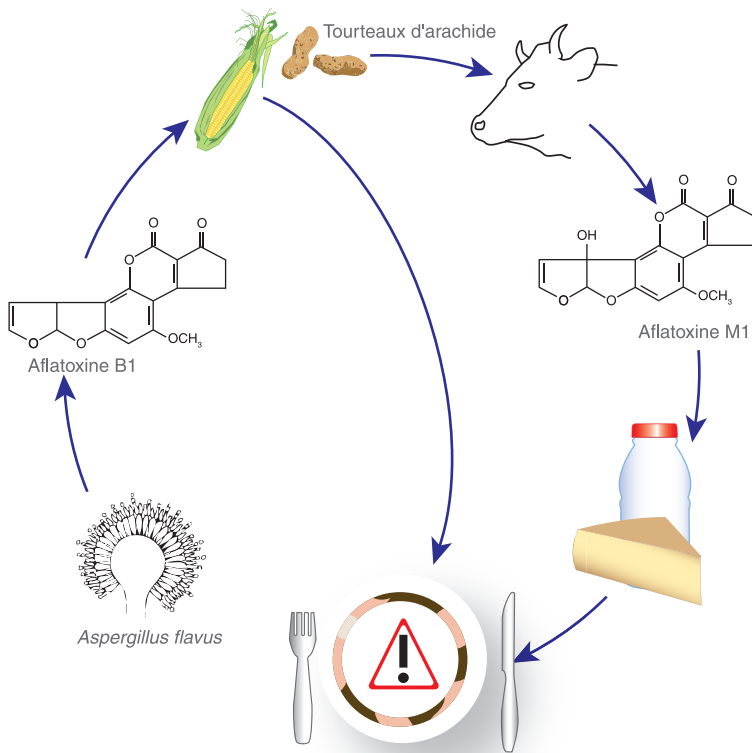
apparaissent lorsque se présente une moisissure du genre *Puccinia* qui abîme ails, asperges et graminées. Les *Coryneum* sont coupables de la maladie criblée des fruits à noyau. Le charbon du blé et de l'orge se doit à *Ustilago nuda*. L'oïdium est lié à l'envahissement des plantes concernées par *Erysiphe cichoraceum*. Il prolifère au printemps ou en automne par un temps chaud associé à une forte humidité ambiante. Il touche surtout les légumes, en particulier les cucurbitacées, les fruits (fraises) mais aussi les arbres ou la vigne. En général, les cultures vivrières très attaquées par des moisissures sont peu productives, et les fruits et légumes atteints sont normalement écartés du circuit commercial.

■ Des mycotoxines dans les aliments

Dans l'exemple de la patuline, le *Penicillium* entre dans la pomme *via* une blessure. Il y sécrète la toxine, qui n'a pas besoin de la moisissure pour persister dans le jus. Les mycotoxines ont une grande stabilité chimique et demeurent dans les aliments même si les moisissures ont disparu. Elles accompagnent alors les aliments dans leur devenir. Dans notre cas, la pomme et la moisissure se rencontrent par exemple au moment où la pomme a chuté au sol. Puis la moisissure produit la patuline dans la chair des pommes. La moisissure peut avoir disparu, mais la toxine déjà produite se concentre dans le jus et les compotes fabriquées à partir de ces fruits. Comme il n'existe pas de procédés efficaces pour éliminer la patuline, celle-ci reste dans le produit alimentaire. Elle est « transférée » au gré de l'élaboration de produits finis, comme les préparations pour les petits pots de bébés, les desserts aux fruits ou encore le pomeau, un apéritif à base de jus de pomme et de calvados. On comprend alors que bien des aliments puissent renfermer des mycotoxines sans moisissures à l'horizon ! Il y a **transfert dans la chaîne alimentaire**.

Les dindons anglais décimés par une moisissure

Il existe de multiples exemples de contamination de la chaîne alimentaire par les mycotoxines, et parfois plus complexes que celui illustré par la patuline. Ainsi, les **afatoxines** ont été mises en évidence à travers un épisode toxique massif survenu dans des élevages de volaille dans l'Angleterre des années cinquante. Des dindonneaux mouraient par centaines en quelques jours. On suspecte assez vite une anomalie au niveau de leur alimentation. Les soupçons se portent sur des tourteaux d'arachide utilisés comme compléments protéiques des rations alimentaires. L'examen microscopique de ces tourteaux montre effectivement la présence de moisissures, en l'occurrence d'*Aspergillus*.



Ce schéma montre le passage d'une mycotoxine, l'aflatoxine, depuis la moisissure jusqu'à dans l'assiette du consommateur.

Des analyses minutieuses épinglent une substance chimique, d'une fluorescence bleue dans les conditions de sa détection. On la dénomme aflatoxine B1 : de « A-fla » pour *Aspergillus flavus*, le nom de l'espèce de moisissure en cause, et B pour *blue*, bleu. Les aflatoxines se révèlent de puissants toxiques pour le foie. Ce sont des cancérogènes parmi les plus agressifs.

Le suspect se cachait aussi dans le lait !

Par comparaison, l'inquiétude s'est portée sur les autres filières animales utilisant des tourteaux d'arachide en complément des rations alimentaires. C'est le cas de la filière laitière. Les vaches reçoivent, surtout en hiver, une alimentation améliorée de tourteaux d'arachide d'importation. Ces tourteaux sont des sous-produits issus du procédé d'extraction de l'huile à partir des arachides. En sortie de presse, les déchets de tiges et d'enveloppes des graines apparaissent sous forme de « gâteaux » brunâtres. Très riches en protéines, ces tourteaux sont valorisés en alimentation animale. Les cultures d'arachide

sont localisées en zone tropicale où le climat chaud et humide y est propice au développement de moisissures au champ ou au stockage des récoltes. Cela peut se produire si les tas d'arachides ne sont pas assez secs. De même lorsque, après lavage des gousses utilisées en huilerie, celles-ci ne sont pas suffisamment séchées. Alors, les *Aspergillus* se développent et foisonnent. Ils produisent en quantité de l'aflatoxine. Le bétail laitier à l'alimentation duquel il est devenu usuel d'adjoindre des tourteaux d'arachide peut ainsi être amené à ingérer ces aflatoxines. Le métabolisme hépatique du ruminant est capable de neutraliser et d'éliminer ces toxines. L'animal ne présentera pas de symptômes particuliers si la quantité d'aflatoxines n'est pas trop importante.

En période hivernale, et en élevage intensif, l'alimentation du bétail laitier est enrichie par des apports protéiques constitués, par exemple, par des tourteaux d'arachide susceptibles d'être contaminés par les aflatoxines.

Cependant, l'aflatoxine B1 est métabolisée par le foie en une forme dite aflatoxine M1, plus soluble que ne l'est sa parente. Elle est éliminée dans l'urine de l'animal mais aussi, et malencontreusement, dans le lait ! Ainsi le lait d'une vache ayant absorbé incidemment des aflatoxines peut contenir de l'aflatoxine M1 (M pour *milk*, lait). Si l'alimentation du bétail laitier n'est pas contrôlée, rien ne permet de se douter d'une telle contamination du lait. De plus, cette mycotoxine a tendance à se fixer sur la caséine. Elle « accompagne » la transformation du lait en produits laitiers comme les fromages, les yaourts ou les desserts lactés. Le mode de fabrication de certains fromages entraîne même une concentration de l'aflatoxine M1, laquelle se retrouve plus abondante à poids égal dans le fromage que dans le lait initial.



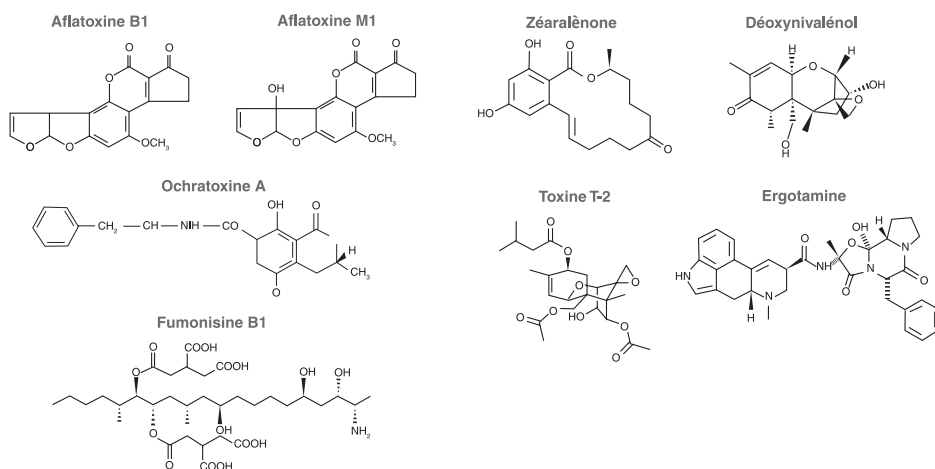


■ Des contaminants dangereux

Une trentaine de mycotoxines sont considérées comme potentiellement dangereuses pour l'homme et l'animal. Parmi celles-ci, une dizaine est particulièrement surveillée par des contrôles réglementaires réguliers.

Les mycotoxines les plus préoccupantes sont les aflatoxines. Présentes sous toutes les latitudes, elles sont très toxiques pour le foie et sont fréquemment retrouvées dans les aliments. Ensuite viennent les trichothécènes, qui contaminent les céréales des régions froides et tempérées. La patuline infecte de nombreux fruits moisiss, l'ochratoxine A se retrouve, quant à elle, dans les céréales. Elle peut nous atteindre par l'intermédiaire des produits dérivés des céréales, du café ou encore *via* les produits élaborés à partir des abats de porcs (qui auraient consommé des grains de blé ou de maïs contaminés). De la même façon, la zéaralénone est produite par des moisissures se déposant sur le maïs et dans les fourrages ensilés mal tassés et insuffisamment séchés. Le bétail peut ainsi s'empoisonner et les denrées d'origine animale (abats, produits charcutiers élaborés à partir du sang de l'animal) renfermer des mycotoxines.

Les mycotoxines sont classées parmi les toxiques naturels les plus puissants. Quelques milligrammes peuvent suffire à être mortels, des doses heureusement rarement observées en alimentation humaine. À titre de comparaison, la dose létale de la toxine botulique, un autre violent poison alimentaire d'origine bactérienne due à un *Clostridium*, se situe, pour un adulte, entre 100 nanogrammes et 1 milligramme par voie orale. Le nanogramme (ng) correspond



à 0,000 000 001 gramme ou 1 milliard de fois plus petit que le gramme. Le danger ne vient pas forcément de la toxine elle-même, mais il peut provenir de ses métabolites. Certaines familles de mycotoxines (alcaloïdes, trichothécènes) ont une toxicité aiguë. Une seule exposition peut suffire à rendre malade ou à tuer. En Europe, de telles mycotoxicoses aiguës sont rarissimes. La plupart du temps, il faut une exposition répétée et longue pour que des effets délétères puissent être ressentis par le consommateur malchanceux. Les effets toxiques sont variés et peuvent affecter la plupart des organes, surtout le foie, les reins, les gonades, le sang ou le système nerveux dont ils perturbent le fonctionnement. Ils peuvent générer des cancers. Le système immunitaire est affaibli, ce qui peut provoquer une vulnérabilité accrue à d'autres maladies.

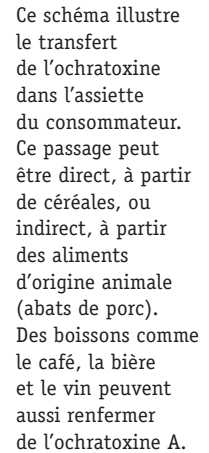
De nos jours, les pays en voie de développement sont les plus touchés, notamment ceux au climat tropical propice au développement des moisissures. Les moyens techniques pour éviter leur propagation ne sont pas faciles à mettre en œuvre ou représentent un coût trop élevé. En outre, il est difficile pour ces pays d'entreprendre des contrôles sanitaires et d'effectuer des analyses en laboratoire, toujours onéreuses, avant la mise sur le marché des aliments.

À la recherche de l'ochratoxine A

L'ochratoxine A est une mycotoxine produite par des *Penicillium* ou par des *Aspergillus*. Son nom a été forgé d'après celui de la moisissure *A. ochraceus*: « ochra-toxine » de « ochra-ceus ». *Penicillium verrucosum* peut aussi, en conditions favorables, produire de l'ochratoxine A en se développant dans l'atmosphère raréfiée et chaude des silos de stockage des céréales. La mycotoxine chemine alors selon le sort réservé aux grains, notamment lors de l'élaboration de tous les aliments dérivés. Le consommateur peut ingérer cette mycotoxine par les céréales du petit déjeuner, ou bien *via* les produits élaborés à partir de farine et des produits issus de la panification. *Aspergillus* et *Penicillium* sont des moisissures communes. De nombreuses denrées peuvent être contaminées par l'ochratoxine A. Cette mycotoxine a été détectée sur les cacahuètes, le soja, le riz, le maïs et particulièrement sur des céréales comme l'orge, l'avoine, le seigle, le sarrasin et le sorgho. Voici une série d'exemples de contamination directe ou indirecte de denrées alimentaires, suivant les « préférences » des moisissures toxigènes :

- *A. ochraceus* est une moisissure commune du café vert et des fèves de cacao. Le café soluble et le chocolat sont ainsi susceptibles de renfermer de l'ochratoxine A ;

- *P. verrucosum* est porté par l'orge et, si celle-ci est insuffisamment séchée avant entreposage, la moisissure peut y trouver moyen d'y croître et



– les produits céréaliers destinés aux animaux d'élevage, en particulier le porc ou la volaille, peuvent aussi être contaminés par l'ochratoxine A. Cette mycotoxine, ingérée par un animal, circule longtemps dans le sang, puis se concentre progressivement dans les reins pour lesquels elle est très toxique.

Si les quantités absorbées ne sont pas trop élevées, la durée moyenne de vie d'une volaille ou d'un porc destiné à l'abattoir ne laisse pas le temps à la maladie de s'installer. Mais l'ochratoxine A circulante s'attachera fortement à l'albumine. Elle contaminera les abats (rognons) ou les produits charcutiers contenant des abats ou du sang de l'animal. On a ainsi détecté de l'ochratoxine A dans des saucisses ou du boudin. En revanche, le bétail laitier, et donc le lait, n'est pas affecté par cette mycotoxine. La flore de leur rumen est capable de dégrader cette molécule la rendant inoffensive, mais cela reste particulier aux ruminants.

■ Quand les mycotoxines empruntent la chaîne alimentaire



Les aflatoxines peuvent toucher le lait et les produits laitiers à cause des compléments protéiques comme les tourteaux d'arachide ajoutés à la ration des vaches laitières. De fil en aiguille, des études sur l'écosystème des *Aspergillus*, essentiellement les espèces *A. flavus* et *A. parasiticus*, ont dévoilé que ceux-ci pouvaient se développer sur de nombreux substrats. On en détecte surtout dans les oléagineux d'intérêt alimentaire et de consommation directe par l'homme : les arachides dites de bouche (cacahuètes), les pistaches, les fèves de cacao et de café, les noix (amandes, noisettes, les noix du Brésil, de cajou, de pécan, etc.), mais aussi les figues et autres fruits secs (raisins), les épices et le maïs. De son côté, l'ochratoxine A peut contaminer de multiples produits comme on l'a vu plus haut. La patuline peut contaminer les fruits à pépins comme les pommes, les poires et les fraises.

La plus grande famille de mycotoxines est celle produite par les *Fusarium*, un genre de moisissures très commun au niveau des cultures et du sol. Les *Fusarium* provoquent des atteintes végétales bien connues des agronomes, avec ou sans production de mycotoxines.

Certaines toxines de *Fusarium*, désignées par le terme de « trichothécènes », contaminent fréquemment les céréales et le maïs. Ces mycotoxines peuvent alors être véhiculées dans tous les produits élaborés à partir des grains de



céréale comme la farine, le pain, les pâtes et tous produits dérivés. On peut aussi les retrouver dans l'alimentation céréalière destinée aux animaux d'élevage. Certaines maladies ont été bien caractérisées en relation avec l'ingestion de ces toxines. Par exemple, la **zéaralène** (ZEA), produite principalement sur le maïs (« *zea* » : maïs) par *F. graminearum*, est une mycotoxine à effet perturbateur endocrinien auquel le porc est très sensible. Cet effet toxique peut en effet diminuer le taux de reproduction dans un élevage.

Les mycotoxines venues du Nord

Les trichothécènes sont fréquentes dans les céréales cultivées dans le nord de l'Europe ou de l'Amérique (États-Unis, Canada). Ainsi, des toxines comme le **diacetoxyscirpenol** (DAS) ou le **nivalénol** (NIV) sont très souvent présentes sur les céréales. Fort heureusement, elles le sont en général à des teneurs suffisamment faibles pour ne pas engendrer un risque caractérisé. Les toxines dites « **T-2** » et « **HT-2** », produites par des *Fusarium*, sont assez typiques de la contamination des céréales en Europe du Nord. Contaminant l'orge, elles peuvent cheminer jusqu'à la bière dont le procédé de fabrication ne permet pas de l'éliminer complètement. La mycotoxine la plus répandue dans le monde provient de *F. graminearum*. Appelée « **déoxynivalénol** » (en abrégé DON), elle contamine le blé, l'orge, l'avoine, le seigle et le maïs.

Les pasteurs se sont inquiétés du risque de persistance du DON dans les pâtes car cette toxine n'est que peu détruite par la chaleur. Seule une partie de la quantité de DON passe dans l'eau de cuisson des pâtes. Il est donc important de bien sélectionner la matière première servant à la confection de cet aliment. Le DON peut figurer à haute teneur dans les céréales, jusqu'à plusieurs milligrammes par kilogramme de grains de blé. Chez le porc nourri avec du blé contaminé, elle provoque un syndrome bien connu correspondant à un refus de nourriture. Le surnom de « vomitoxine » qui lui a été donné explicitant bien l'une de ses propriétés toxiques, l'effet vomitif.

Les **fumonisines**, dont la structure a été élucidée seulement en 1988, sont produites par *F. verticillioides* ou *F. graminearum*. Elles sont redoutables notamment pour les chevaux, qui peuvent en mourir. Les fumonisines ont été identifiées sur l'avoine, le blé, le maïs et aussi sur le riz. Des contaminations récurrentes des céréales, du maïs et du riz ont été signalées en Italie, en Chine et en Afrique du Sud. Ce dernier pays étant celui où ces mycotoxines ont été identifiées pour la première fois.

Des *Claviceps* se développent sur un épi de seigle en formant un sacculé ressemblant à un ergot. Ces sacculés sont bourrés d'alkaloïdes, des mycotoxines provoquant l'ergotisme, une maladie endémique (le feu de saint Antoine) dans les temps anciens très invalidante et souvent mortelle.



Et bien d'autres mycotoxines

Les petits ruminants comme les moutons peuvent entrer en contact avec des mycotoxines portées par certaines graminées des pâturages, en particulier dans les parties humides et ombragées des prairies.

Certaines familles de mycotoxines affectent peu l'homme et ont même disparu de nos récoltes grâce à l'amélioration constante des pratiques culturales. Aujourd'hui, elles ne provoquent qu'accidentellement des intoxications chez des animaux en pâturage :

– la maladie dite de l'« ergot de seigle » : le seigle atteint porte sur ses épis des petits saccules en forme d'ergot formés par les moisissures et bourrés d'alcaloïdes hautement toxiques. Des moisissures du genre *Claviceps* en sont responsables et elles ont provoqué jadis de terribles endémies et famines. Ce n'est qu'au ^{xix}^e siècle que l'on a identifié la cause et isolé les premiers alcaloïdes. Ce type d'intoxication, appelé « ergotisme », peut encore affecter des troupeaux paissant dans des prairies dégradées par la présence de nombreux sclérotés de *Claviceps* sur les graminées : ray-grass, fétuque, dactyle. Ces sclérotés, amas de mycélium de forme allongée, se développent particulièrement lors de printemps plutôt frais et très humides ;





– la **citrinine** (CIT) : elle est souvent coproduite avec la patuline ou avec l'ochratoxine A dont elle semble renforcer la toxicité. Elle peut contaminer certaines denrées comme le maïs, le riz, des céréales, les noix, les graines de tournesol, les produits secs de salaisonnerie et le fromage. La citrinine peut être décelée dans un colorant rouge très utilisé en Asie et produit par une moisissure du genre *Monascus*;

– l'**acide cyclopiazonique** : il est souvent coproduit avec l'aflatoxine B1 par *Aspergillus flavus* sur les graines oléagineuses. Les *Penicillium*, en particulier *P. cyclopium* ou *P. camemberti*, sont capables de produire cette toxine, par exemple sur le fromage, dans certaines conditions. Cependant, elle reste localisée au niveau de la croûte du fromage. Elle ne représente pas un risque important pour l'homme, ni d'ailleurs pour les animaux (céréales, légumineuses);

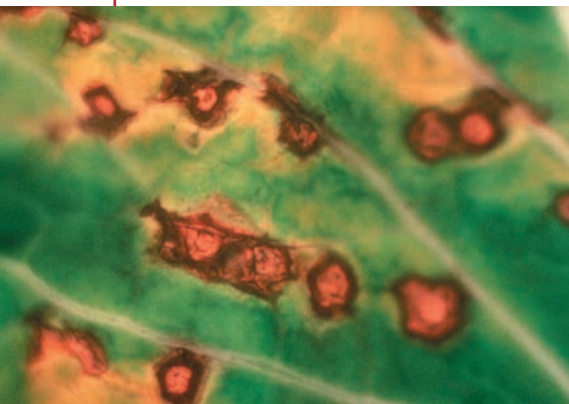
– les **sporidesmines** : elles apparaissent sur des prairies riches en dactyles et en ray-grass lors d'automnes humides succédant à des étés chauds et secs. Les ruminants (ovins), y compris les ruminants sauvages comme les chevreuils, sont particulièrement exposés. Ces toxines provoquent un eczéma facial et une dermatite infectieuse pouvant être mortels. Les sporidesmines sont synthétisées par la moisissure *Pithomyces chartarum*. Il a été démontré que le taux de toxine est proportionnel à la sporulation de la moisissure. Aussi, un examen du contenu en spores par gramme d'herbe humide donne une bonne indication du risque mycotoxinique;

– les **stachybotriotoxines** : ce sont des mycotoxines synthétisées par *Stachybotrys chartarum*. Elles se développent dans les ensilages, le foin et surtout la paille en conditions humides. Les chevaux sont les animaux les plus touchés et ils peuvent en mourir en quelques heures. Aucun cas de

Les chevaux peuvent développer une maladie grave appelée l'encéphalomalacie équine à cause de la contamination de l'avoine par des fumonisines.



Connue sur tous les continents, la moisissure *Alternaria* est souvent impliquée dans les allergies respiratoires.



Les déchets ménagers sont naturellement contaminés par tout un ensemble de moisissures qui participent à leur dégradation et à leur recyclage organique.



contamination humaine n'a été rapporté, sauf exceptionnellement chez des agriculteurs par inhalation de spores de *Stachybotrys* après la manipulation de paille fortement moisie;

- les toxines dites «**trémorgènes**» provoquent des syndromes neurologiques comme des tremblements involontaires et irréguliers («**tremor**»). Elles comprennent des mycotoxines produites par des *Aspergillus* ou des *Penicillium*. Parmi ces toxines, on compte la roquefortine et les penitremes. Elles ont été isolées à partir du maïs, d'ensilages et de différents fourrages, mais également de la bière, du fromage frais, de noix et de viande fermentée. La roquefortine et la PR toxine (pour «*P. roqueforti* toxine») sont deux mycotoxines trémorgènes produites par *Penicillium roqueforti*. Des souches de cette moisissure sont utilisées dans la maturation des fromages bleus, type roquefort ou gorgonzola. Heureusement, la PR toxine est instable dans cette matrice! Bien entendu, la sélection de

souches non toxigènes en technologie fromagère a permis d'éviter la présence de ces mycotoxines et garantit la salubrité des fromages affinés. Bien que *P. roqueforti* soit présent sur les céréales conservées dans des conditions acides et dans les ensilages fermentés, il semblerait que la roquefortine n'ait pas été isolée de céréales ou d'aliments destinés à l'animal;

- les **phomopsines** sont des mycotoxines synthétisées par *Phomopsis leptostromiformis* dont l'hôte habituel est une légumineuse, le lupin. Elles atteignent ainsi de préférence les ovins.

De plus en plus utilisé en agriculture biologique pour l'alimentation animale mais aussi humaine, le lupin doit recevoir une attention nouvelle en raison de ce risque mycotoxinique assez mal connu;

- les **toxines d'endophytes**: certaines graminées fourragères telles que la fétuque et le ray-grass anglais peuvent être contaminées par des micromycètes endophytes du genre *Neotyphodium*. Ces champignons vivent en symbiose avec la plante. Ils synthétisent des alcaloïdes durant la croissance de leur hôte. Ainsi,



Neotyphodium coenophialum contamine la fétuque *Festuca arundinacea* et produit des alcaloïdes neuro-toxiques. L'un d'entre eux, l'ergovaline, est considéré comme la principale mycotoxine responsable de la « toxicose de la fétuque ». *N. lolii* contamine, quant à lui, le ray-grass anglais en synthétisant de l'ergovaline mais surtout du lolitrème B, un alcaloïde trémorgène. Cet alcaloïde est responsable d'une maladie affectant les ovins et au nom évocateur de « tournis du ray-grass ». De nombreux pays sont touchés par les maladies liées aux toxines d'endophytes. Une étude française indique que plus de la moitié des lots de fétuque commerciale est infectée par des endophytes à des taux relativement élevés ;



– les **toxines d'*Alternaria*** : les moisissures du genre *Alternaria* sont connues sur tous les continents. Elles contaminent aussi bien les cultures que le sol et les déchets alimentaires ménagers. Les fruits et les légumes (pommes, tomates, olives, graines de tournesol ou de colza) sont susceptibles d'être contaminés aussi bien au champ qu'après la récolte. *Alternaria* se développe beaucoup plus facilement sur les fruits abîmés consécutivement à un stress lié au froid. Néanmoins, le danger associé à ce type de moisissures relève plus des propriétés allergisantes de leurs spores que de leur contenu en mycotoxines. L'alternariol et l'acide ténuazonique sont deux des mycotoxines produites par *Alternaria*. Les teneurs de ces toxines dans les aliments sont en général très faibles. L'exposition de l'homme et des animaux est considérée comme insignifiante sur le plan toxicologique.

■ Des moisissures résistantes et des mycotoxines ultrarésistantes !

Les moisissures sont des organismes vivants et, en tant que tels, elles sont sensibles aux techniques de destruction par la chaleur comme la stérilisation et la pasteurisation. Au contraire, les mycotoxines sont des molécules chimiques de configurations diverses : polycétoacides, terpènes, cyclopeptides ou métabolites azotés. Cela leur confère une grande résistance à la température et donc aux traitements thermiques usuels de préparation des aliments. La durée et le mode de conservation des aliments par maintien au frais, par congélation, voire lyophilisation (épices), n'ont que très peu d'effets sinon aucun sur les mycotoxines. Mêmes les sucs gastriques acides du consommateur ne les détruiront pas ! En revanche, les herbivores abritent dans leur

rumen une flore intestinale particulière qui peut participer à la destruction de mycotoxines. L'ochratoxine A est ainsi dégradée par la fraction protozoaire du rumen, ce qui rend ces ruminants peu sensibles à une contamination par l'ochratoxine A.

La torréfaction du café contribue à la destruction de l'ochratoxine A, éventuellement présente, à hauteur de 50 % environ.

Enfin, les mycotoxines (sauf la patuline) sont peu solubles dans l'eau. Ce sont des forces hydrophobes qui les maintiennent dans les substrats alimentaires. Même si la moisissure n'a pas survécu ou a été éliminée de l'aliment au cours de sa préparation, des aliments d'apparence saine peuvent encore contenir des mycotoxines.

Certains procédés de fabrication des aliments permettent tout de même d'éliminer des mycotoxines comme, par exemple, la torréfaction des graines de

café. Il est ainsi possible de détruire près de 50 % de l'ochratoxine A éventuellement présente dans le café.

Des traitements thermiques et chimiques combinés entre eux pour assainir les graines oléagineuses ou les céréales sont capables d'éliminer spécifiquement les mycotoxines sans endommager la denrée. Ils ne sont cependant pas autorisés en alimentation humaine par crainte de susciter la production collatérale de sous-produits nocifs pour l'être humain. Et que le remède soit pire que le mal ! Ces traitements peuvent cependant être tolérés pour les céréales destinées aux animaux de rente dont la courte durée de vie, ou la plus grande résistance, ne leur laissera pas le temps de manifester de problème clinique.

Ainsi, les tourteaux d'arachide, très intéressants comme apports azotés et protéinés du bétail laitier, sont traités à l'ammoniaque sous pression, ce qui a pour effet de casser la molécule d'aflatoxine, la rendant ainsi inoffensive.



■ Les mycotoxines : une question de santé publique

Les moisissures sont des micro-organismes dits « ubiquitaires », c'est-à-dire très répandus. Quand elles sont soumises à un stress, elles synthétisent des toxines (mycotoxines) pouvant être dangereuses même à très faibles doses. Les moisissures se développent sur des substrats très variés. Elles peuvent contaminer par leurs toxines un grand nombre d'aliments. Les mycotoxines peuvent ainsi être acheminées le long de la chaîne alimentaire pour atteindre *in fine* le consommateur. Les animaux, et en particulier les



animaux d'élevage, sont également susceptibles d'être incommodés par ces toxines *via* leur alimentation. Très résistantes et invisibles, il est difficile de s'en débarrasser. C'est pourquoi les mycotoxines représentent un problème de santé publique et qu'une législation a dû être édictée pour contrôler leur présence dans l'alimentation.

Les moisissures en tant que telles, productrices ou non de toxines, peuvent provoquer des maladies chez un être vivant. Souvent, cela se passe par envahissement des tissus (peau, muqueuse, poumon), et on parle alors de **mycose**. Alors que, en dehors de toute présence de moisissures, ingérer leurs toxines (mycotoxines) *via* l'alimentation induit d'autres maladies caractéristiques appelées **mycotoxicoses**. Véhiculées par le sang, les mycotoxines se concentrent dans le foie, les reins ou d'autres organes et agissent au niveau cellulaire. Dans le cas des mycoses, les syndromes relèvent de l'infectiologie, et des remèdes spécifiques existent, des antifongiques notamment. Pour les mycotoxicoses, la toxicité des mycotoxines est très variable et peut s'exprimer à court terme (effets aigus) ou à long terme (cancérogénicité). Il n'existe pas de remèdes spécifiques et les soins en cas de maladie déclarée seront choisis en fonction de la symptomatologie.

Des intoxications graves en Afrique

Le problème des mycotoxines est essentiellement lié à leur ingestion par voie alimentaire. Dans les cas aigus (aliments très contaminés), retirer l'aliment contaminé et reprendre une alimentation saine aura pour effet d'atténuer progressivement les effets toxiques et de faire assez rapidement disparaître les symptômes, si ceux-ci ne sont pas irréversibles. Cela a été maintes fois observé chez les animaux. Chez l'homme, certaines familles de mycotoxines peuvent être mortelles (cas des alcaloïdes de l'ergot de seigle, aflatoxines, toxine H-2/HT-2).

Grâce aux mesures publiques de contrôle sanitaire instaurées dans nos pays, cela est dorénavant devenu exceptionnel et relève plutôt de l'accident ou de la fraude (cas d'incorporation d'un lot contaminé dans un lot exempt pour la confection d'un aliment fini). Les cas d'intoxication humaine sont plus fréquents dans des pays où l'offre alimentaire est plus restreinte (Afrique, Inde) et où le climat de type tropical est davantage propice aux contaminations par des moisissures toxigènes, *Aspergillus* notamment. En outre, les bonnes pratiques agricoles et de stockage y sont souvent mal connues ou mal suivies. Enfin, l'acceptation de consommation de denrées un peu moisies peut malheureusement représenter un complément en cas de famine. Des cas de cette nature ont été répertoriés en Afrique subsaharienne.

Une contamination à distance

En général, les mycotoxines transférées dans la chaîne alimentaire le sont en quantités très faibles, de l'ordre du nanogramme par kilogramme d'aliment (ng/kg). Ces teneurs semblent infimes, mais pour certaines mycotoxines génotoxiques ou cancérogènes leur ingestion répétée dans le temps (une vie par exemple) pourrait contribuer à la survenue de certains cancers. C'est une raison majeure pour laquelle les mycotoxines font l'objet de mesures de santé publique sévères, tout comme d'autres contaminants de l'environnement entrant dans la chaîne alimentaire (pesticides, métaux lourds, etc.). Les animaux d'élevage ne vivent en général pas assez longtemps pour développer un cancer, mais les faibles quantités de mycotoxines se localisent dans leurs tissus et constituent un risque pour le consommateur d'aliments comme le lait, les produits charcutiers ou les abats. Ces produits animaux doivent également répondre aux règles de salubrité et sont pour cela très surveillés.

La maladie du « poumon du fermier » est une mycose allergique due aux spores d'une moisissure que l'agriculteur aura respirée en maniant de la paille moisie. Si la moisissure est un *Aspergillus*, des mycotoxines peuvent être produites.

La contamination initiale est parfois très éloignée dans le temps de la consommation d'un aliment. Ainsi, la pomme est infectée dans le verger au sol, ou bien au stockage par contact avec un fruit avarié. Le jus de pomme contenant de la patuline peut être consommé plusieurs mois après la récolte des pommes et par un nombre important de consommateurs. La moisissure n'est plus visible, les produits portant des mycotoxines ne présentent pas de désagréments détectables à la vue ou à l'odorat. On peut tout à fait méconnaître ce danger niché dans nos aliments. Les consommateurs souvent l'ignorent et ne peuvent pas, à leur niveau, identifier ce danger. La contamination d'une

ressource alimentaire (par exemple, la farine) peut concerner tout une ligne de production et atteindre *in fine* un grand nombre de consommateurs. D'ailleurs, l'Organisation mondiale de l'agriculture (FAO) estime qu'un quart des récoltes de céréales dans le monde est bon an mal an touché par les mycotoxines. C'est pourquoi l'alimentation humaine et animale est globalement soumise à des contrôles officiels fréquents au niveau national et lors des échanges internationaux.

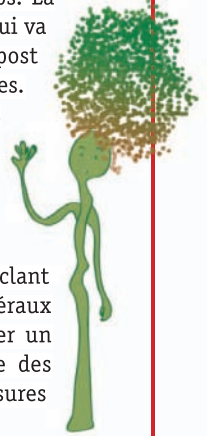




Moississures et compost

De nos jours, on encourage les particuliers à pratiquer le compostage de leurs déchets alimentaires. Le compost est obtenu par décomposition des matières organiques diverses. Ce processus naturel est dû à l'action de bactéries et de moisissures. Il s'effectue en deux temps. La première phase correspond à l'altération des déchets par des bactéries aérobies, ce qui va provoquer une élévation en température de la zone de compostage. Ensuite, le compost se transforme en humus grâce à l'action des champignons, notamment des moisissures. Il est inutile d'ensemencer le compost avec des micro-organismes car les bactéries et les spores de champignons sont présentes dans l'air ambiant en quantité et qualité suffisantes. Il est en revanche conseillé de brasser et de mouiller souvent le compost afin d'assurer un apport régulier d'air et d'eau, ce qui renforcera l'activité des micro-organismes.

Le compost permet aux particuliers de valoriser leurs déchets organiques en les recyclant pour un usage comme activateur de cultures. Le terreau produit est enrichi en minéraux (azote, phosphore...) très intéressants pour des plantes en pot ou pour fertiliser un jardin potager. En respectant des règles élémentaires d'hygiène (gants, lavage des mains...), la pratique du compost, du fait de la nature des bactéries et des moisissures qui s'y trouvent, n'est pas dangereuse pour les particuliers.



■ Les mycotoxines se respirent aussi !

Peut-on être contaminé par les mycotoxines par une voie autre qu'alimentaire ? Oui, par inhalation ou par contact direct avec la peau. Les moisissures (*Aspergillus*, *Alternaria*, *Cladosporium*) par elles-mêmes peuvent provoquer des allergies respiratoires bien connues, telles que rhinite, conjonctivite et asthme. Une exposition à une atmosphère viciée par des moisissures (habitat humide insalubre) est un facteur aggravant de l'asthme. Les moisissures peuvent aussi « coloniser » les poumons d'une personne immunodéprimée. C'est le cas de l'aspergillose pulmonaire, une mycose souvent due à *Aspergillus fumigatus*. Quant aux toxines de moisissures, portées par des poussières, elles peuvent nous contaminer par voie aérienne et provoquer des allergies par voie respiratoire ou par contact avec les muqueuses.

Les moisissures se disséminent par l'intermédiaire de leurs spores transportées par l'air ou véhiculées par des insectes. Les mycotoxines se concentrent volontiers dans ces spores qui, dans une ambiance confinée, contaminent l'air respirable. Adsorbées sur des particules organiques ou sur les poussières, les mycotoxines peuvent être inhalées et atteindre les alvéoles pulmonaires. De

là, elles rejoignent la circulation sanguine, entraînant des troubles généraux respiratoires et/ou spécifiques d'organes. Ces cas extrêmes se rencontrent dans certains milieux professionnels comme sur les docks et dans les soutes de bateaux transportant, en vrac ou par sacs, des céréales ou des tourteaux pouvant être contaminés par des taux élevés d'aflatoxines. De même, chez l'agriculteur, le maniement de la paille ou de foin mal séchés et abritant des moisissures toxigènes peut dégager dans l'atmosphère respirée une charge pernicieuse en mycotoxines.

Des cas de pneumopathies d'hypersensibilité ont été observées chez des ouvriers en salaison par inhalation de la « fleur » de saucisson. La fleur est constituée de moisissures de type *Penicillium* (*P. nalgiovensis* notamment) traditionnellement utilisées à l'étape d'étuvage pour le développement des arômes.

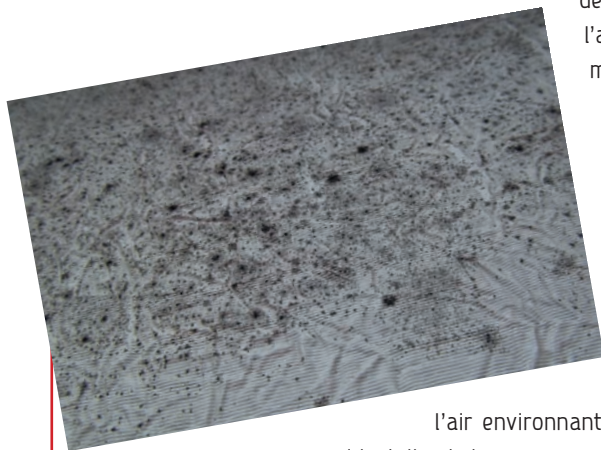
De nombreuses spores contenant des mycotoxines avaient été retrouvées dans

l'air environnant. Cette voie de contamination reste cependant accidentelle et des mesures d'hygiène adaptées à ces ateliers de fabrication suffisent à pallier ce risque.

Une contamination liée à l'humidité ambiante

Chez un particulier, une habitation très humide, au point d'être insalubre, est un lieu privilégié de développement de moisissures. Elles se déposent sur les murs et les spores peuvent être dispersées dans l'air ambiant respiré par ses habitants. Des toxines d'*Aspergillus*, d'*Alternaria* ou encore de *Stachybotrys* peuvent y être identifiées, mais la connaissance des risques associés à cette voie de contamination est insuffisante. Se préoccuper de la qualité de l'air intérieur est d'ailleurs nouveau. Des travaux sont nécessaires pour caractériser cette voie d'exposition.

Dans un autre registre, une étude a récemment procédé au recensement des particules présentes dans les émanations liées aux opérations de déversement d'ordures ménagères. Des mycotoxines y ont été identifiées. Une analyse sans surprise puisque les déchets en décomposition sont, par définition, envahis par des moisissures. Ainsi, des *Aspergillus*, des *Penicillium*, *Stachybotrys atra*, tous producteurs potentiels de mycotoxines, ont été mis en évidence. C'est une préoccupation nouvelle pour les agents préposés à la collecte et au tri des ordures ménagères. Ce risque pourrait éventuellement



Un habitat insalubre, ou simplement une pièce mal aérée, mal chauffée et humide comme une salle de bains, entraîne une apparition de moisissures sur les murs ou le plafond. Certaines de ces moisissures peuvent produire des mycotoxines.



concerner les populations habitant à proximité de décharges, d'autant que des synergies avec d'autres contaminants, pesticides, métaux lourds et autres COV (composés organiques volatils), pourraient renforcer la toxicité de ces molécules inhalées.

Enfin, les animaux d'élevage comme les ruminants, en pâture ou à l'étable, peuvent être en contact avec des moisissures dermo-nécrosantes et/ou entraînant des vasoconstrictions des extrémités également nécrosantes. C'est le cas bien caractérisé du stachybotriotoxicose chez le cheval, une affection qui peut être mortelle.