

Document réalisé dans le cadre du projet
« *Etude de la multicontamination (mycotoxines, ETM) des productions végétales de grande culture en conditions de plein champ* »

Manuel pratique

pour l'anticipation et la gestion optimale de la contamination naturelle des grains ou graines en plein champ par les mycotoxines de *Fusarium* et les éléments traces

Décembre 2014



Projet coordonné par l'ACTA et l'INRA avec le soutien financier du CASDAR



INTRODUCTION

Un contexte exigeant

La demande sociale d'une alimentation de qualité est de plus en plus forte.

L'étude de l'alimentation totale française 2 (EAT2) menée par l'ANSES, a été rendue publique le 1^{er} juillet 2011, présentant les résultats obtenus sur l'exposition des consommateurs aux contaminants présents sous forme de résidus dans l'alimentation. Cette étude pointe notamment des risques de dépassement des seuils toxicologiques pour le plomb, le cadmium, l'arsenic inorganique, ainsi que pour une famille de mycotoxines (Déoxynivalenol ou DON et ses dérivés). Les contributeurs majoritaires sont par exemple, le pain pour le cadmium, le plomb, le DON et ses dérivés. A travers cette étude, l'ANSES insiste sur la nécessité de poursuivre les actions de gestion des risques dans le sens de la réglementation et auprès des filières afin de réduire les teneurs de ces contaminants dans les aliments principalement contributeurs. Les productions végétales issues de grandes cultures, à la base de notre alimentation, sont fortement concernées.

Parallèlement, en 2009, l'EFSA a produit un avis sur le cadmium proposant de réviser fortement à la baisse les seuils de l'OMS. La même année, un avis sur l'arsenic conclut à la possibilité d'une exposition d'origine alimentaire trop élevée pour certaines populations. Ces conclusions ont conduit la commission européenne à réfléchir à un abaissement des seuils réglementaires pour l'alimentation humaine. Il est donc crucial de comprendre les raisons des niveaux de contamination élevés, non encore clairement identifiés à l'échelle de la parcelle ou du bassin versant.

Compte tenu de la toxicité de certains des éléments traces ou toxines, leur concentration est réglementée pour l'alimentation humaine (EC 1881/2006) et l'alimentation animale (EC 32/2002). L'agriculture doit alors produire des végétaux dont la concentration en contaminants dans les produits récoltés est inférieure à cette réglementation. De plus, le contexte est très propice à un durcissement de la réglementation concernant la teneur en éléments traces des produits agricoles à destination de l'alimentation humaine et animale, aussi bien au niveau national qu'européen. Par exemple, sur la base d'une étude épidémiologique récente, l'European Food Safety Authority (EFSA) a publié le 30 Janvier 2009, une recommandation spécifiant que l'exposition humaine au cadmium (Cd) par voie alimentaire ne devrait pas dépasser $2,5 \mu\text{g Cd.kg}^{-1}$ de masse corporelle par semaine, seuil presque 3 fois inférieur au précédent proposé par l'OMS ($7 \mu\text{g Cd.kg}^{-1}$ de masse corporelle). Ces recommandations ont conduit à une révision des seuils réglementaires (règlement UE n°488/2014) qui ont peu concerné les grandes cultures. Ce règlement a été assorti d'une recommandation de la Commission du 4 avril 2014 sur la réduction de la présence de cadmium dans les denrées alimentaires. Ce texte incite les Etats membres à expliquer aux agriculteurs les méthodes de réduction de contamination des produits agricoles par le cadmium, sans préciser les méthodes. Il est préconisé aussi la poursuite de travaux de recherche permettant de combler les lacunes de connaissances concernant les mesures de réduction du cadmium dans les denrées. Les Etats membres devront remonter à l'EFSA des résultats d'analyse de cadmium dans les denrées régulièrement, et des rapports en 2015 et 2018 sur les progrès des mesures de

réduction de cadmium, avec une attention particulière aux teneurs en cadmium approchant ou dépassant les teneurs maximales.

Au niveau national, face aux inquiétudes des filières grandes cultures et des agriculteurs face à la réglementation européenne de plus en plus exigeante (mycotoxines et éléments traces métalliques) et face à la réduction de l'usage des produits phytosanitaires (plan Ecophyto) ou à des cahiers des charges spécifiques, l'enjeu est donc d'anticiper en mettant en œuvre des pratiques permettant de minimiser la contamination afin d'assurer des productions végétales conformes à une réglementation plus exigeante dans un contexte où les pratiques agronomiques encouragées pourraient augmenter le risque de contamination (recyclage des matières organiques pour les métaux, diminution des traitements phytosanitaires pour les mycotoxines, réduction de l'irrigation pouvant entraîner des épisodes de stress hydrique et générant ainsi des conditions favorables à une contamination par les mycotoxines).

Actuellement, les teneurs de certains métaux (cadmium et plomb) et mycotoxines dont le deoxynivalenol (DON) sont règlementées en Europe (EC 1881/2006 and EC 56/2005). Ainsi, suivant les années, plus de 10 % de la production annuelle de blé dur ont présenté une concentration en DON supérieure à la valeur limite. Pour le cadmium, entre 14 et 85 % de la production de blé dur présentaient des concentrations supérieures à 0,1 mg/kg. Des teneurs élevées peuvent aussi être rencontrées dans les tourteaux de tournesol puisque plus de 15 % de la production française suivie dans le cadre du plan de surveillance des oléagineux présentent une concentration entre 0,8 et 1 mg/kg, cette valeur étant la valeur limite pour l'alimentation animale. Une meilleure gestion de la contamination des céréales et oléagineux est donc indispensable pour garantir leur commercialisation.

Les processus expliquant la contamination sont complexes (figure 1) et le manque de références techniques et scientifiques, de données explicatives et d'indicateurs prédictifs aboutis, rend difficile un bon accompagnement des professionnels dans la gestion des contaminations de leurs cultures.

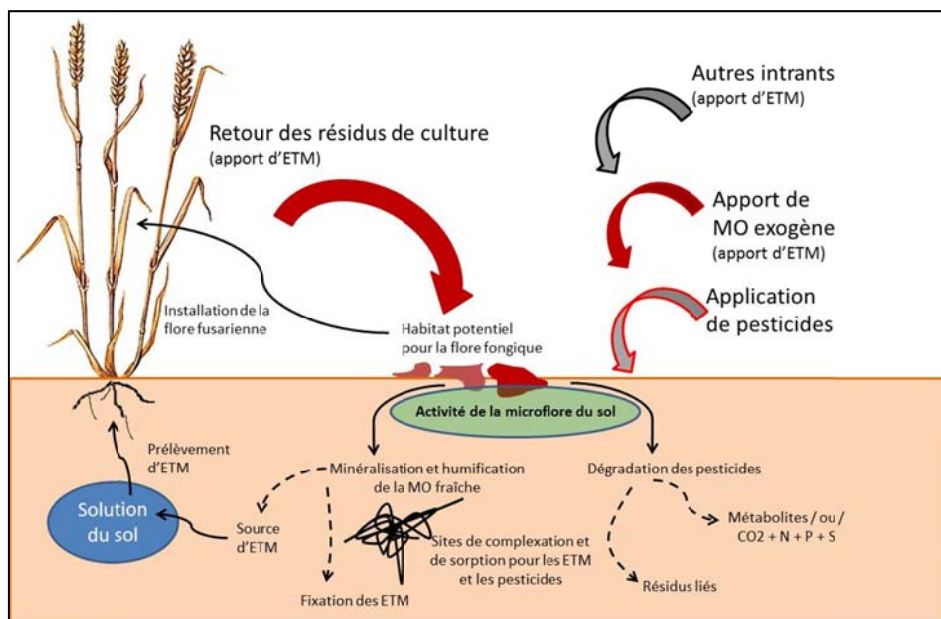


Figure 1 : Impact et devenir des contaminants dans les sols agricoles de grandes cultures

Quels sont les objectifs du manuel ?

Devant les obligations réglementaires (EC 1881/2006 et EC 32/2002), l'agriculteur peut éprouver des difficultés à trouver des informations synthétiques claires sur les contaminations en mycotoxines et éléments traces métalliques, qui l'aident à mieux comprendre les relations entre les facteurs pédologiques, climatiques et agronomiques pour la maîtrise des niveaux de contamination élevés.

A qui est destiné le manuel ?

Le manuel est à destination des agriculteurs, des conseillers qui les encadrent et des professionnels de la formation et de l'enseignement technique et supérieur.

Comment utiliser le manuel ?

Le manuel propose des fiches pour les deux types de contaminant : mycotoxines et ETM, qui se déclinent selon trois thèmes : Généralités (série A), Facteurs explicatifs (série B) et Outils et méthodes (série C).

SOMMAIRE

Introduction

Fiches Généralités

- A0 : Eléments traces métalliques
- A1 : Arsenic
- A2 : Cadmium
- A3 : Cuivre
- A4 : Mercure
- A5 : Plomb
- A6 : Mycotoxines de *Fusarium*
- A7 : DON
- A8 : Fumonisines
- A9 : T2/HT2
- A10 : Zéaralénone

Fiches Facteurs explicatifs

- B0 : Transfert sol-plante : notion de phytodisponibilité
- B1 : Sol et disponibilité pour la plante
- B2 : Plante
- B3 : Climat
- B4 : Pratiques culturales
- B5 : Voies de prélèvement et d'accumulation
- B6 : Facteurs de risque fusariose
- B7 : Contexte climatique
- B8 : Gestion des résidus de culture
- B9 : Sensibilité variétale

Fiches Outils et méthodes

- C0 : Grilles agronomiques d'évaluation du risque et modèles agro-climatiques
- C1 : Détection des mycotoxines

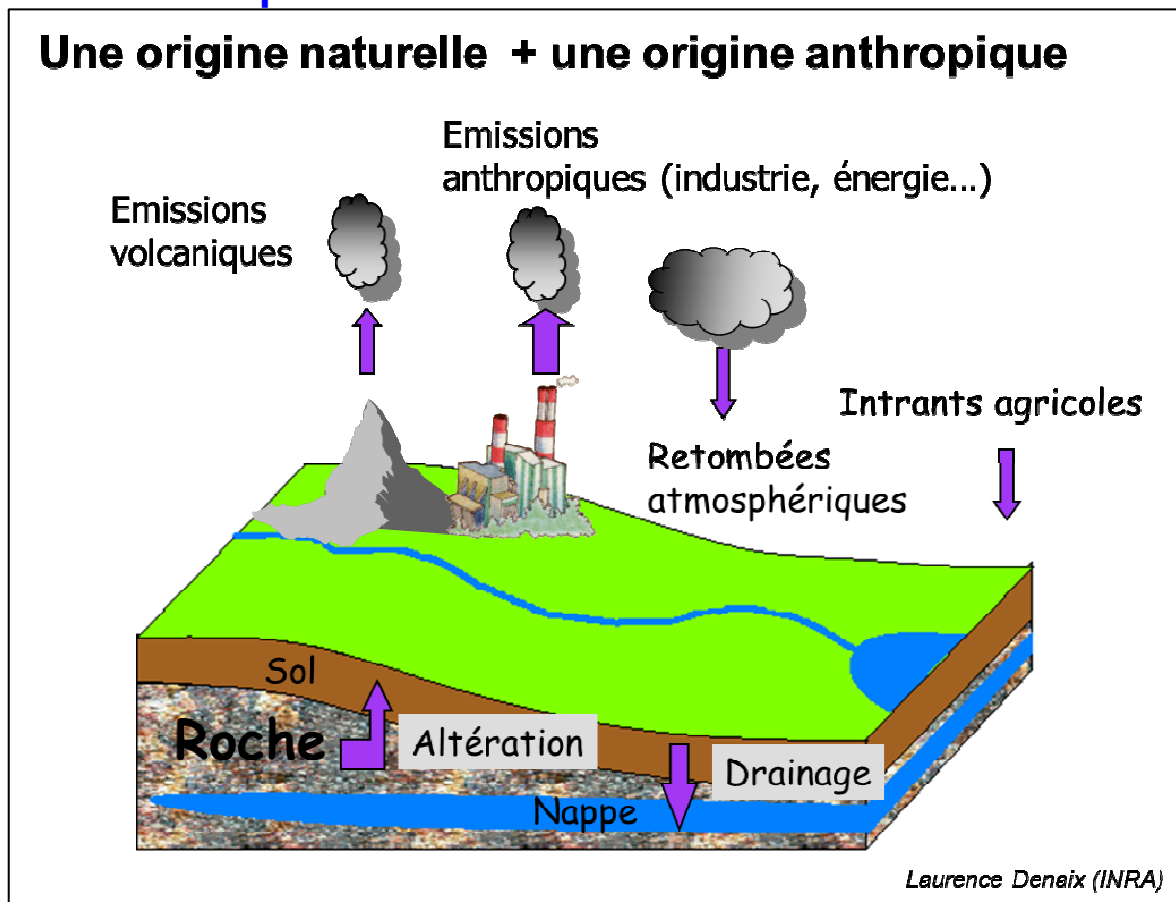
De quoi s'agit-il ?

Les éléments traces correspondent aux éléments naturellement et généralement présents dans un milieu (sol, être vivant) à l'état de trace (< 100 mg/kg de matière sèche). Certains sont nécessaires à la vie microbienne, animale et/ou végétale en quantités faibles, ce sont les oligoéléments. Mais tous, en quantités trop élevées, deviennent (phyto)toxiques. Du fait de processus naturels (anomalies géochimiques) ou d'activités anthropiques (contaminations), les éléments traces peuvent se retrouver concentrés dans les sols à des niveaux élevés.

Dénommés métaux lourds (ce qui correspond à une définition physique de masse volumique supérieure à 5 g/cm³), les ETM les plus connus pour leur dangerosité sont le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn). Il faut ajouter à cette liste l'arsenic (As) et le sélénium (Se), qui ne sont que des éléments traces et pas des métaux.

Les ETM étant non dégradables, si les apports excèdent les pertes (exportation des récoltes, lessivage), il peut y avoir accumulation.

Sources et fréquence

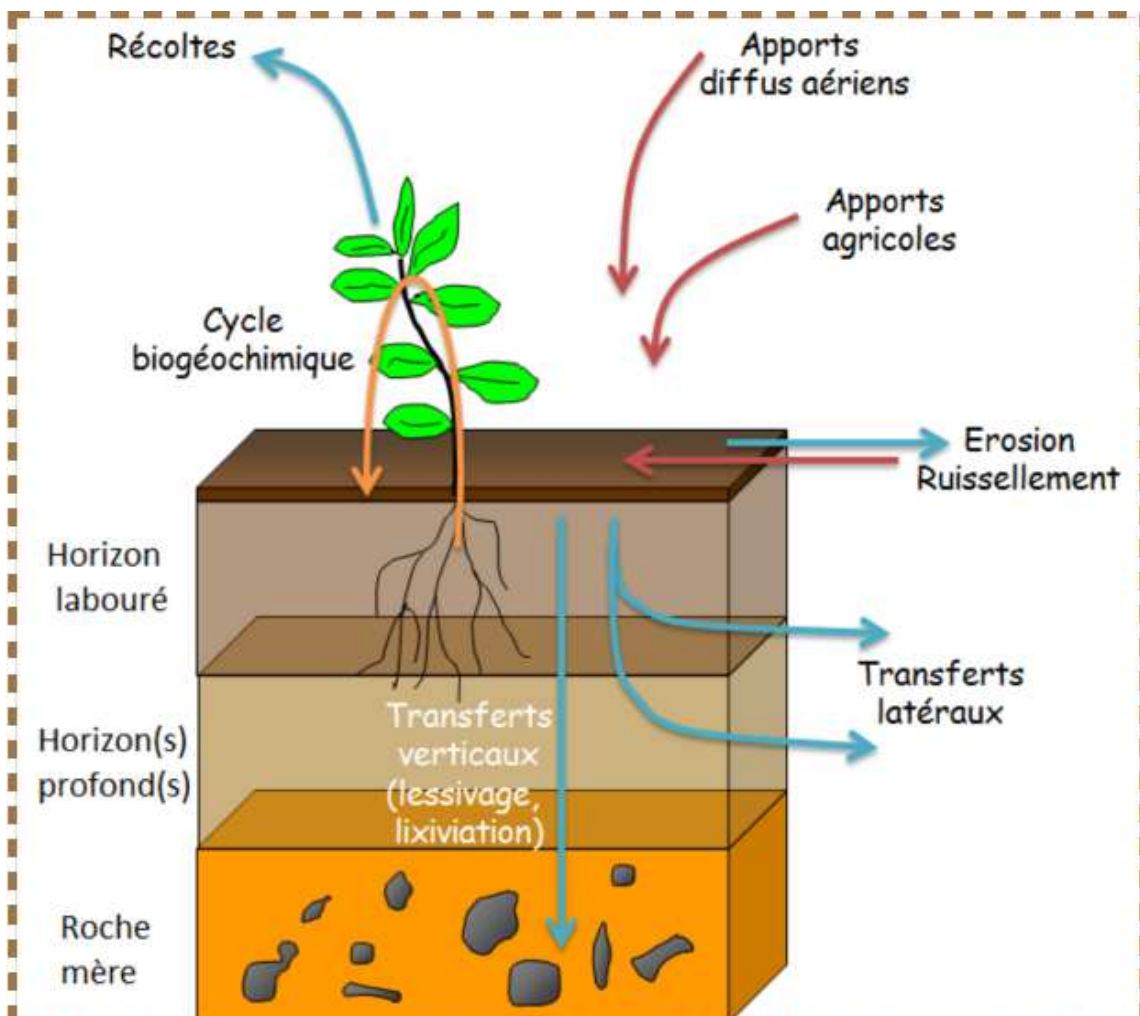


On sépare traditionnellement les éléments-traces dont l'origine est naturelle (fond géochimique ou, dans le cas des sols, fond pédo-géochimique), des éléments naturels mais dispersés dans le milieu par des activités humaines (origine anthropique).

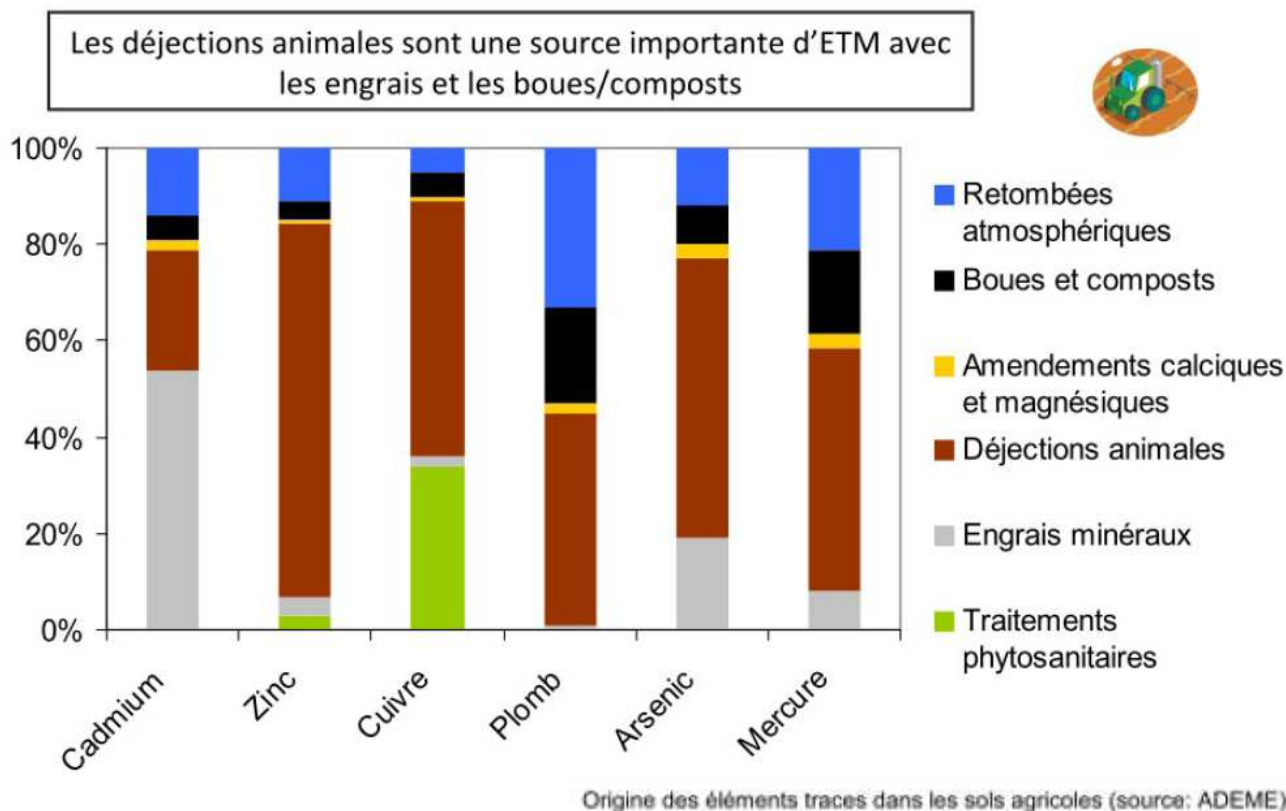
Les teneurs en éléments traces sont variables selon les types de roches. Certaines roches ont des concentrations très élevées en éléments traces (jusqu'à plusieurs %), et sont qualifiées de minerais. Le sol résulte de l'altération de la roche mère sous-jacente sous l'influence de processus physiques, chimiques et biologiques. Les éléments traces présents dans les roches se retrouvent donc dans les sols, à des teneurs variables selon la composition initiale de la roche mère et le type de pédogenèse qui a eu lieu. De même, les éléments traces sont présents dans tous les autres compartiments de l'environnement de façon naturelle et normale, dans les eaux, dans l'air et dans les êtres vivants.

Les éléments d'origine anthropique s'ajoutent localement aux éléments d'origine naturelle, et font augmenter d'autant les concentrations dans les sols, les eaux et l'air. Leur forme chimique est souvent plus disponible pour les êtres vivants que celle des éléments d'origine naturelle (qui sont par exemple plus fortement fixés au sol). Ils présentent donc, dans la plupart des cas, davantage de risque pour les écosystèmes.

Les plantes supérieures prélèvent les éléments traces de l'eau ou de l'air *via* leurs parties aériennes et les éléments traces du sol *via* leurs racines. De plus, les tissus des plantes peuvent relâcher les éléments traces dans le sol et les feuilles peuvent le faire dans l'air (les éléments traces sont alors sous forme gazeuse). Ainsi, l'accumulation des éléments traces dans les plantes dépend à la fois du prélèvement dans les tissus et du relâchage dans le milieu environnement.



Certains apports anthropiques d'éléments traces sont peu ou pas contrôlables car liés à de nombreuses activités humaines. Pour d'autres apports anthropiques, il est possible de faire une évaluation de ce qui entre sur la parcelle (intrants agricoles).



Réglementation

*Règlement (CE) 1881/2006 de la Commission européenne (19 décembre 2006) fixant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les **denrées alimentaires**.*

Les denrées alimentaires qui ont des teneurs en contaminants plus élevées que celles spécifiées à l'annexe du présent règlement ne peuvent pas être mises sur le marché.

Les teneurs maximales concernent la partie comestible des denrées alimentaires. Elles s'appliquent également aux denrées alimentaires composées ou transformées, séchées ou diluées, éventuellement par application d'un facteur de concentration ou de dilution, ou en tenant compte des proportions relatives des ingrédients dans le produit composé.

→ Plomb, cadmium

*Directive (CE) 32/2002 du Parlement européen et du Conseil du 7 mai 2002, sur les substances indésirables dans les **aliments pour animaux***

La présente directive établit des seuils destinés à limiter au maximum la présence de substances et produits indésirables dans les aliments pour animaux dès le moment où ces aliments sont mis en circulation sur le territoire de l'Union européenne.

→ Plomb, cadmium, arsenic, mercure

Consulter les fiches

- **A1 : Arsenic**
- **A2 : Cadmium**
- **A3 : Cuivre**
- **A4 : Mercure**
- **A5 : Plomb**

De quoi s'agit-il ?

L'arsenic est un élément trace largement répandu dans la biosphère. D'un point de vue chimique, il est défini comme un métalloïde, car il présente à la fois les propriétés des métaux et celles des non-métaux. Dans certaines régions, les concentrations d'arsenic dans le sol et dans l'eau sont très élevées, que ce soit naturellement ou du fait des activités humaines.



*L'As est classé
comme substance
cancérogène pour l'Homme.*

Les composés de l'arsenic peuvent être classés dans les composés inorganiques (sans liaison arsenic-carbone) et les composés organiques (avec une liaison arsenic-carbone).

La spéciation revêt une importance capitale pour les composés de l'arsenic, car les différentes espèces varient fortement du point de vue de leur toxicité. La toxicité des espèces de l'arsenic que l'on retrouve habituellement dans l'alimentation est généralement constatée dans

l'ordre suivant : arsénite (AsIII), arséniate (ASV), acide diméthylarsinique (DMA), acide monométhylarsinique (MMA), arsénobétaïne (AsB).

Sources et fréquence

Présent sur de nombreux sites industriels pollués, on le retrouve aussi dans certains sols agricoles suite à des traitements antifongiques (arboriculture et viticulture) et insecticides dans l'agriculture.

L'arsenic peut être aussi présent naturellement de façon importante dans les sols français (anomalies géochimiques).

Si les concentrations totales d'arsenic dans les céréales (par exemple le riz ou le blé) et les légumes sont nettement moins importantes que celles trouvées dans les fruits de mer, une part considérable de cet arsenic est inorganique et sa toxicité est donc bien plus élevée.



*Un apport d'**engrais phosphatés** diminue le prélevement d'As par les racines. L'ion sulfate est aussi un compétiteur de l'arséniate vis-à-vis du prélevement par la plante.*

Réglementation

*Directive CE 32/2002 du Parlement européen et du Conseil du 7 mai 2002, sur les substances indésirables dans les **aliments pour animaux***

La présente directive établit des seuils destinés à limiter au maximum la présence de substances et produits indésirables dans les aliments pour animaux dès le moment où ces aliments sont mis en circulation sur le territoire de l'Union européenne.

Grain(e)s/Produits	Arsenic
	<i>CE 32/2002 Animaux</i>
	<i>mg/kg matière fraîche</i>
Blé, son, germe	10
Autres céréales	10
Soja	10
Tournesol, Colza	10
Pulpe de betterave	10
Maïs ensilage	40

Pour en savoir plus

- Anne Tremel-Schaub et Isabelle Feix (2015). Contamination des sols. Transferts des sols vers les plantes. Ed. EDP Sciences

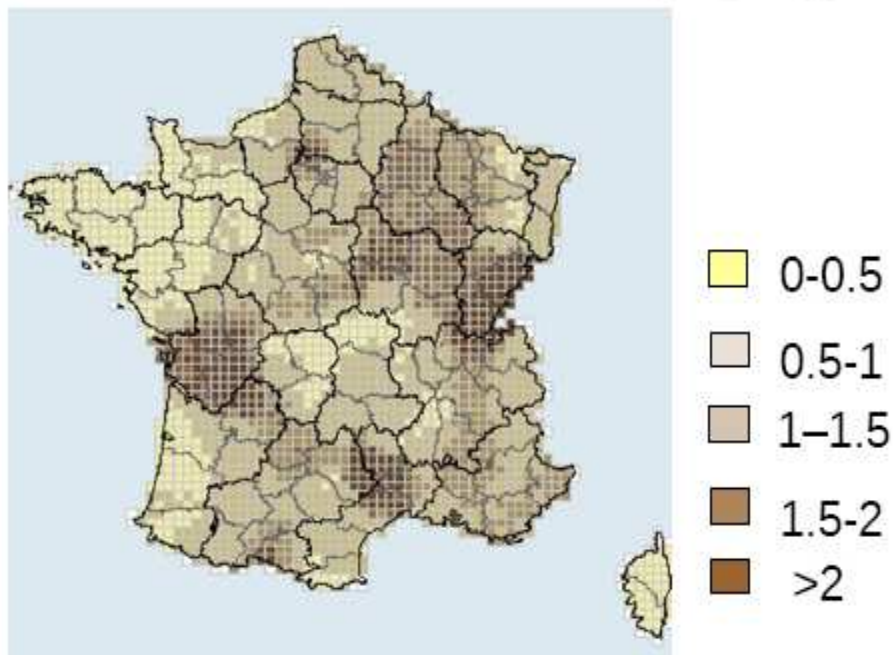
De quoi s'agit-il ?

C'est un élément naturel qui est présent dans le sol, l'eau et l'air en raison de l'abrasion des rochers, de l'érosion des sols, des incendies de forêts et des éruptions volcaniques. Dans certaines régions, le cadmium s'enrichit dans l'environnement en raison de l'application d'engrais aux phosphates ou d'autres activités anthropiques. Bien que des minéraux de cadmium existent, le cadmium est produit en général en tant que produit secondaire de la production de zinc. De faibles quantités de cadmium sont produites pendant la production d'autres métaux non ferreux tels que le plomb et le cuivre.

La voie principale d'absorption du cadmium (hors cigarettes) est constituée par l'ingestion de nourriture. Ceci est dû au fait que le cadmium est présent à l'état de traces dans les produits alimentaires : le cadmium qui est présent dans le sol est facilement absorbé par les légumes, céréales et cultures fourragères, qui sont, à leur tour, utilisés pour nourrir les animaux ou qui sont consommés directement par les humains. Dans le corps (humain), le cadmium s'accumule principalement dans le foie et les reins.

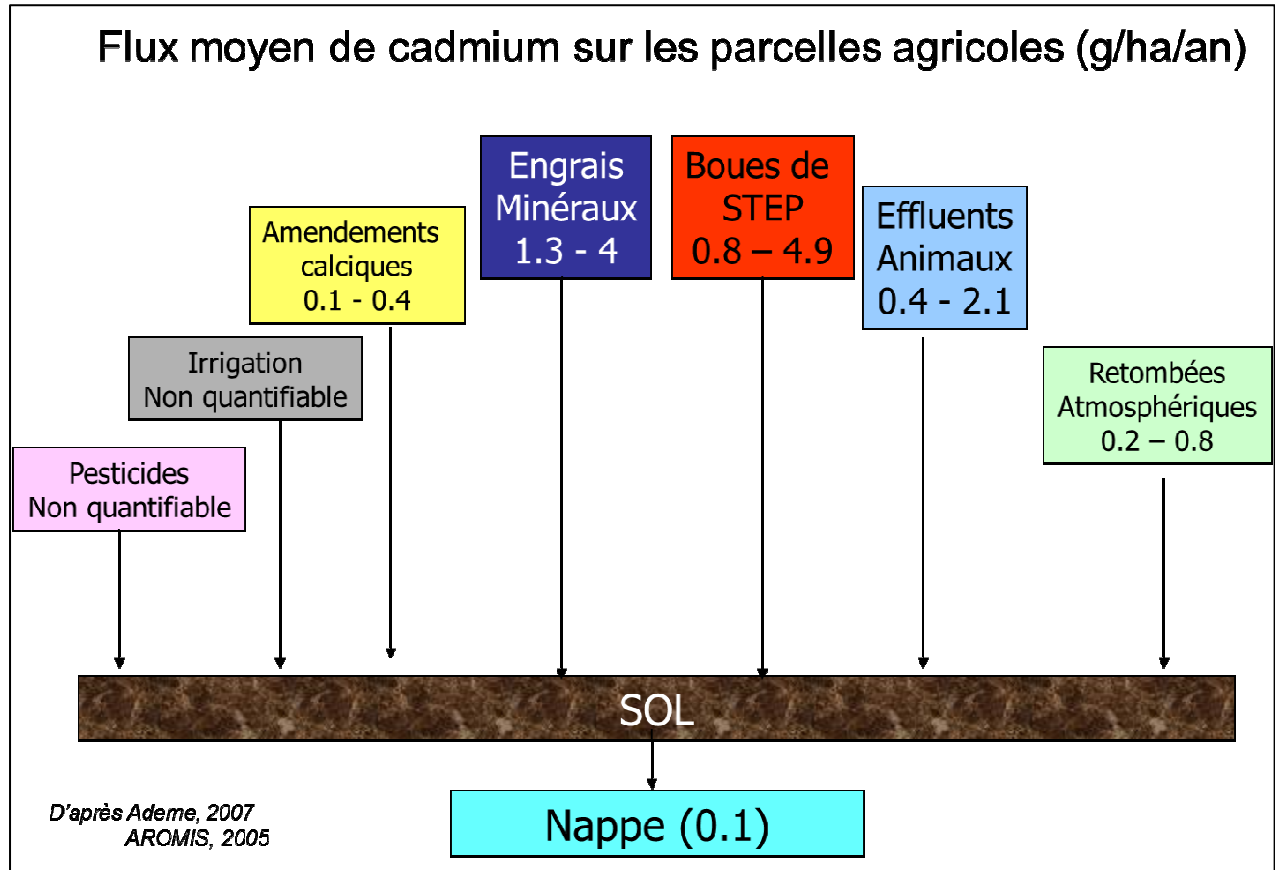
Sources et fréquence

Teneur en Cd total du sol (mg/kg)



Données RMQS

(<http://acklins.oreans.inra.fr/geoindiquasol/index.php>)



Réglementation

Règlement (CE) N° 1881/2006 de la Commission européenne (19 décembre 2006) fixant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les **denrées alimentaires**

Les denrées alimentaires qui ont des teneurs en contaminants plus élevées que celles spécifiées à l'annexe du présent règlement ne peuvent pas être mises sur le marché.

Les teneurs maximales concernent la partie comestible des denrées alimentaires. Elles s'appliquent également aux denrées alimentaires composées ou transformées, séchées ou diluées, éventuellement par application d'un facteur de concentration ou de dilution, ou en tenant compte des proportions relatives des ingrédients dans le produit composé.

Directive CE/32/2002 du Parlement européen et du Conseil, du 7 mai 2002, sur les substances indésirables dans les **aliments pour animaux**

La présente directive établit des seuils destinés à limiter au maximum la présence de substances et produits indésirables dans les aliments pour animaux dès le moment où ces aliments sont mis en circulation sur le territoire de l'Union européenne.

Grains/Produits	Cadmium	
	<i>CE 32/2002 Animaux</i>	<i>CE 1881/2006 Humains</i>
	<i>mg/kg MF</i>	<i>mg/kg MF</i>
Blé, son, germe	1	0.2
Autres céréales	1	0.1
Soja	1	0.2
Tournesol, Colza	1	-
Pulpe de betterave	1	-
Maïs ensilage	1	-

L'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a rendu un avis en janvier 2009 établissant un nouveau niveau d'absorption hebdomadaire tolérable pour le cadmium (Dose Hebdomadaire Tolérable : DHT), passant de 7 µg/kg de poids corporel à 2.5. L'EFSA a confirmé la DHT de 2,5 µg/kg de poids corporel en janvier 2011.

La Commission européenne a proposé à l'issue d'une consultation organisée le 26 mai 2011 par la DG SANCO de nouvelles limites pour le cadmium en alimentation humaine sur céréales et produits céréaliers.

Grains/Produits	Cadmium	
	<i>Limites actuelles</i>	<i>Propositions</i>
	<i>mg/kg MF</i>	<i>mg/kg MF</i>
Blé tendre	0.2	0.1
Son et germe	0.2	0.15
Blé dur	0.2	0.15
Autres céréales	0.1	0.075
Produits pour enfants	-	0.01-0.05

Facteurs explicatifs de la variabilité des teneurs en cadmium

- Effet de la localisation dans le sol du cadmium sur sa disponibilité physico-chimique.
- Effet du pH sur la biodisponibilité du cadmium : à pH plus élevé, la concentration dans le végétal est souvent plus faible.
- Effet de la matière organique sur la biodisponibilité du cadmium : lors d'apports de matières organiques, la concentration dans le végétal est souvent plus faible.
- Effet de la fertilisation azotée : quantité et forme d'azote apportée.
- Effet variétal : variétés faiblement/fortement accumulatrices.

Pour en savoir plus

- Anne Tremel-Schaub et Isabelle Feix (2015). Contamination des sols. Transferts des sols vers les plantes. Ed. EDP Sciences

De quoi s'agit-il ?

Le cuivre est un élément naturellement présent dans la nature et principalement sous forme de minerais de cuivre. Il s'agit d'un métal "essentiel" c'est-à-dire qu'il intervient dans les processus du métabolisme des organismes.

Il est très utilisé dans les industries car c'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité. Il entre dans la composition de nombreux alliages (laiton, bronze, maillechort). Sous forme de sels de cuivre, il est utilisé comme fongicide (bouille bordelaise) ou algicide en agriculture, pour les traitements chimiques de surface, le tannage des peaux, etc.

Sources et fréquence

Le cuivre est présent dans l'environnement de manière ubiquitaire. Sa concentration dans l'écorce terrestre est estimée à environ 70 ppm (30 à 100 ppm).

Le transport par le vent des poussières de sol, les éruptions volcaniques, les décompositions végétales, les feux de forêts et les aérosols marins constituent les principales sources naturelles d'exposition.

La contamination des sols est due principalement aux scories d'extraction et de broyage des minerais de cuivre dans lesquelles le cuivre est présent sous forme de sulfures ou de silicates insolubles.

Les autres sources de contamination des sols sont les boues provenant des usines de traitement des eaux usées, les déchets de galvanoplastie, l'industrie du fer et de l'acier et les dépôts de cuivre non recyclés provenant de la plomberie et des installations électriques.

Dans les eaux, le cuivre provient pour la majeure partie de l'érosion des sols par les cours d'eau : 68 % ; de la contamination par le sulfate de cuivre : 13 % ; et des rejets d'eaux usées qui contiennent encore du cuivre, même après traitement.



*Le chaulage ou l'apport de matières organiques diminuent le transfert du Cu vers les plantes. Le **Zn** ralentit l'absorption du Cu.*

Pour en savoir plus

- Anne Tremel-Schaub et Isabelle Feix (2015). Contamination des sols. Transferts des sols vers les plantes. Ed. EDP Sciences

De quoi s'agit-il ?

Le mercure est présent en faibles concentrations dans la croûte terrestre, principalement dans les gisements de sulfures, d'où il est extrait depuis des siècles pour des usages très variés.

Le mercure est un métal lourd présent sous plusieurs formes, toutes pouvant produire des effets toxiques à fortes doses.

Son degré d'oxydation zéro, Hg^0 , existe sous forme de vapeur ou de métal liquide, son premier degré d'oxydation, Hg^+ , existe sous forme de sels inorganiques et son deuxième degré d'oxydation, Hg^{2+} , peut former soit des sels inorganiques soit des composés organomercurés (généralement, mono- et diméthylmercure, et plus rarement, phénylmercure). Les effets des trois groupes sont différents.

Parmi les effets toxiques, figurent les lésions au cerveau, aux reins et aux poumons.

Présence et fréquence

Les composés de méthylmercure sont mobiles, biodisponibles et fortement toxiques pour tous les organismes vivants. Ces composés sont également volatils et peuvent donc être absorbés par les feuilles des végétaux.

Plus la teneur en matière organique est importante dans le sol et plus la présence (relativement à la teneur totale en Hg) de méthylmercure est importante.

Réglementation

*Directive 2002/32/CE du Parlement européen et du Conseil, du 7 mai 2002, sur les substances indésirables dans les **aliments pour animaux***

La présente directive établit des seuils destinés à limiter au maximum la présence de substances et produits indésirables dans les aliments pour animaux dès le moment où ces aliments sont mis en circulation sur le territoire de l'Union européenne.

Grain(e)s/Produits	Mercure
	CE 32/2002 Animaux
	mg/kg MF
Matières premières des aliments	0.1

Pour en savoir plus

- Anne Tremel-Schaub et Isabelle Feix (2015). Contamination des sols. Transferts des sols vers les plantes. Ed. EDP Sciences

De quoi s'agit-il ?

Le plomb est par importance le 36^{ème} élément constitutif de l'écorce terrestre qui en contient 14,8 mg/kg. C'est un métal très mou, malléable et dense, de couleur blanc-bleuâtre.

En raison de son rayon ionique, le plomb peut se substituer à de nombreux autres éléments (ex : potassium, sodium, calcium).

Sources et fréquence

Naturellement présent dans le sol et dans l'eau, on le retrouve dans tous les compartiments de l'environnement, fréquemment dans les minerais, associé au cuivre, au zinc et à l'argent, rarement à l'état natif.

L'utilisation passée du plomb dans l'essence et les émissions historiques par les producteurs de métaux non-ferreux ont entraîné une augmentation des concentrations de plomb dans le sol, l'eau et l'air. Son absorption racinaire est très faible et la majeure partie du plomb présent dans les parties des plantes situées hors du sol provient de dépôts atmosphériques de plomb. Le plomb trouvé dans les sols agricoles est à relier aux activités industrielles, aux munitions (chasse, guerre), aux exploitations minières et aussi aux gaz d'échappement automobile.

Réglementation

*Règlement (CE) N° 1881/2006 de la Commission européenne (19 décembre 2006) fixant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les **denrées alimentaires**.*

Les denrées alimentaires qui ont des teneurs en contaminants plus élevées que celles spécifiées à l'annexe du présent règlement ne peuvent pas être mises sur le marché.

Les teneurs maximales concernent la partie comestible des denrées alimentaires. Elles s'appliquent également aux denrées alimentaires composées ou transformées, séchées ou diluées, éventuellement par application d'un facteur de concentration ou de dilution, ou en tenant compte des proportions relatives des ingrédients dans le produit composé.

*Directive CE/32/2002 du Parlement européen et du Conseil, du 7 mai 2002, sur les substances indésirables dans les **aliments pour animaux***

La présente directive établit des seuils destinés à limiter au maximum la présence de substances et produits indésirables dans les aliments pour animaux dès le moment où ces aliments sont mis en circulation sur le territoire de l'Union européenne.

Grains/Produits	Plomb	
	CE 32/2002 Animaux	CE 1881/2006 Humains
	mg/kg MF	mg/kg MF
Blé, son, germe	10	0.2
Autres céréales	10	0.1

Soja	10	0.2
Tournesol, Colza	10	-
Pulpe de betterave	10	-
Maïs ensilage	40	-

Pour en savoir plus

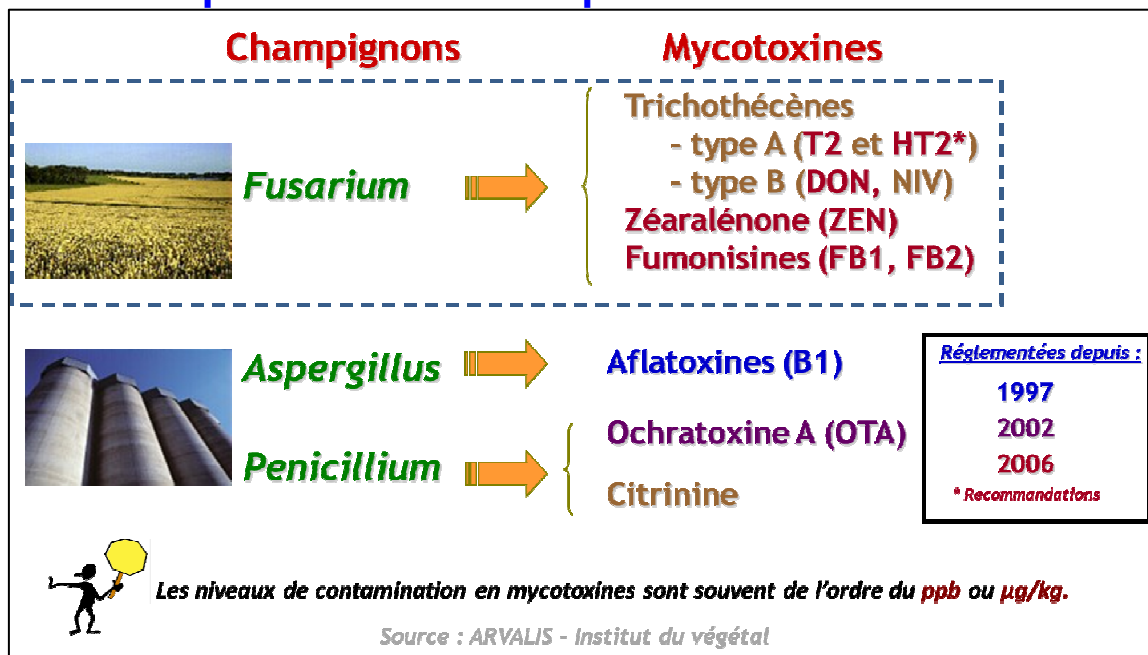
- Anne Tremel-Schaub et Isabelle Feix (20015). Contamination des sols. Transferts des sols vers les plantes. Ed. EDP Sciences

De quoi s'agit-il ?

Les mycotoxines sont des petites molécules très résistantes, contaminants naturels de nombreuses denrées d'origine végétale. Elles sont produites par différentes espèces et certaines souches de champignons microscopiques sur et dans les grain(e)s au champ ou en cours de stockage, dans différentes conditions de température et d'humidité. Cela concerne notamment les céréales et les produits manufacturés issus de ces filières destinés à l'alimentation humaine. Elles sont également présentes dans les grains, fourrages et aliments composés destinés à l'alimentation animale et peuvent être retrouvées dans le lait, les œufs, les viandes ou les abats, si les animaux ont été exposés à une alimentation contaminée par les mycotoxines.

Lorsque les mycotoxines sont produites par des champignons se développant au champ sur la plante, elles sont communément appelées « mycotoxines de champ ». Les « mycotoxines de stockage » produites au cours du stockage dans certaines conditions ne sont pas traitées dans ce manuel.

Mycotoxines produites au champ



Toxicité et effets sur la santé

Généralement thermostables, elles ne sont pas détruites par les procédés habituels de cuisson et de stérilisation. Certaines mycotoxines ont une toxicité aiguë très marquée (exposition unique à une forte dose). Toutefois, en Europe, ce type d'exposition est exceptionnel chez l'homme et concerne plutôt les filières animales. L'exposition répétée à de faibles doses, voire très faibles doses (effets chroniques), est la plus redoutée pour l'être humain, en raison des habitudes alimentaires ainsi que du pouvoir de persistance de ces toxines.

Plus de 300 d'entre elles ont été identifiées, mais seule une trentaine possède des propriétés toxiques réellement préoccupantes pour l'homme ou l'animal et seule une dizaine

contamine fréquemment les denrées alimentaires. Une espèce de champignon peut produire différentes mycotoxines et une mycotoxine peut être produite par plusieurs espèces de champignons : plusieurs toxines peuvent donc se retrouver dans un même aliment.

En raison des structures chimiques très diversifiées des mycotoxines, les effets toxiques induits par ces toxines (ou leurs métabolites) sont variés : cancérigène, mutagène, tératogène, oestrogénique, neurotoxique ou immunotoxique.



Cultures concernées

Blé tendre, blé dur, triticale, avoine, seigle, mais aussi maïs et sorgho.

Perte de rendement de 10 à 15 q/ha.

Aliments contributeurs et exposition du consommateur

D'après l'Etude de l'Alimentation Totale française 2 (EAT 2) menée par l'ANSES sur près de 20 000 produits alimentaires collectés sur l'ensemble du territoire métropolitain, les principaux aliments à base de céréales contributeurs à l'exposition de la population française sont : d'abord le pain et les produits de panification sèche, la pâtisserie, gâteaux et viennoiserie, les biscuits, les pâtes, les céréales pour petit déjeuner et les pizzas et quiches.

Réglementation

La législation de l'Union européenne protège les consommateurs comme suit :

- Établissement de taux maximum pour les mycotoxines dans les denrées alimentaires et les aliments pour animaux pour s'assurer qu'elles ne nuisent pas à la santé humaine ou animale
- Maintien des taux de mycotoxines aussi bas que raisonnablement possible par l'observation des bonnes pratiques en matière d'agriculture, de stockage et de traitement.

Des taux maximum pour les mycotoxines et certains autres contaminants dans les denrées alimentaires sont fixés dans le **règlement (CE) No 1881/2006** et les amendements ultérieurs. Les dispositions sur les modalités de prélèvement d'échantillons et les méthodes d'analyse dans le cadre du contrôle officiel des taux de mycotoxines sont définies dans le **règlement (CE) No 401/2006**.

De quoi s'agit-il ?

Le déoxynivalénol (DON) appartient à l'un des plus grands groupes de toxines, à savoir le type mycotoxines trichothécènes B, qui sont produites, en particulier par des moisissures appartenant au genre *Fusarium*. On a identifié, jusqu'à une époque récente, jusqu'à 170 mycotoxines trichothécène. En raison du cycle époxyde, ces molécules sont toxiques.

Selon leurs fonctionnalités, cette famille de mycotoxines est divisée en quatre classes : A, B, C, D. En raison de son groupe fonctionnel carbonyle à la position C8, le déoxynivalénol (DON) appartient aux trichothécènes de la classe B, comme le nivalénol (NIV) et certains dérivés comme le 3-acétyldéoxynivalénol (3-AcDON), ainsi que le 15-acétyldéoxynivalénol (15-AcDON).

Pendant la mouture, la majeure partie du DON est récupérée dans la fraction de son et la concentration la plus basse se trouve dans la farine. Le DON est une mycotoxine qui survit tout à la fois à la cuisson et au processus de brassage.

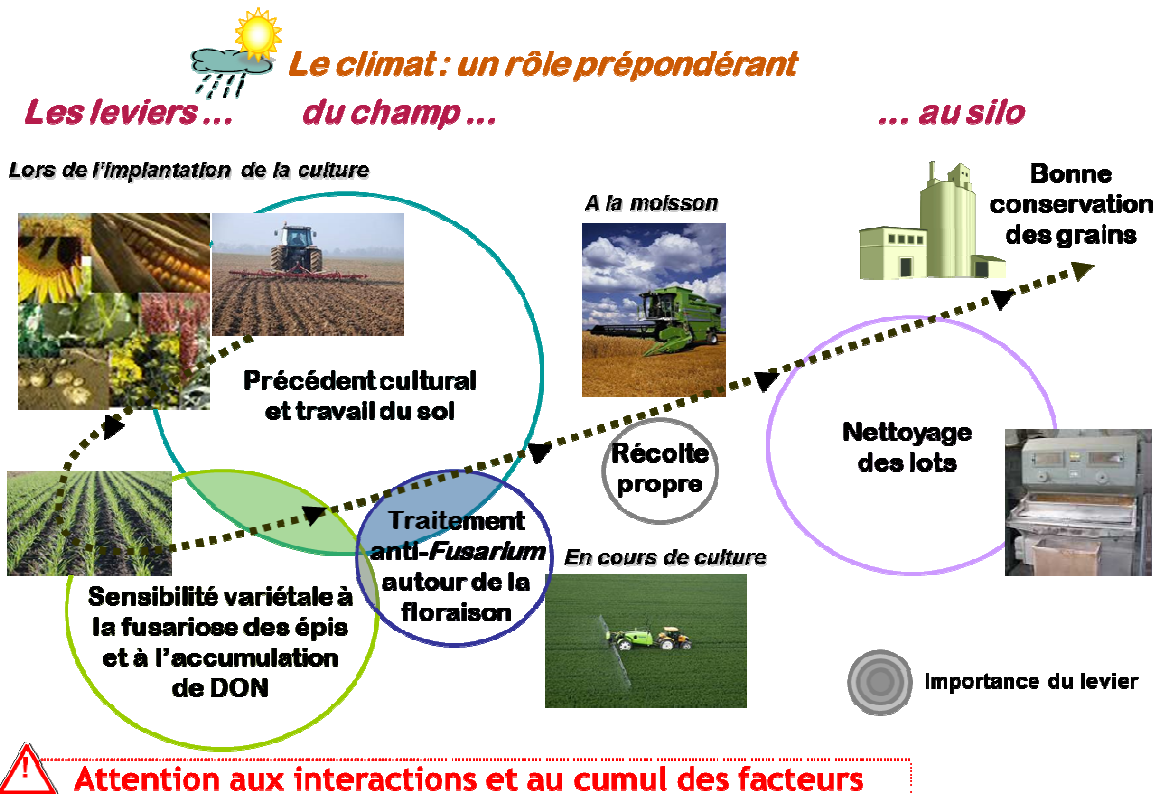
Présence et fréquence

Des enquêtes ont démontré que le DON est largement réparti dans les céréales en tant que contaminant naturel. On trouve ces mycotoxines à la suite d'attaques de *Fusarium graminearum* et *culmorum* pendant la floraison des céréales. Au champ, la teneur en DON du blé tendre et des autres céréales est principalement sous la dépendance du climat, à savoir la pluie au moment de la floraison. D'autres facteurs, secondaires, peuvent moduler l'effet du climat : la présence de résidus de culture (rotation culturale, travail du sol), la sensibilité à la fusariose de la variété de céréale cultivée ou la protection phytosanitaire utilisée. Les deux espèces *Fusarium* (*F. graminearum* et *F. culmorum*) sont les moisissures les plus importantes produisant le type B.

Le DON, qui est le type B le plus prévalent de trichothécène, peut être trouvé principalement dans le maïs, l'avoine, l'orge et le blé.

Le DON se trouve principalement dans les grains sur lesquels le *Fusarium* se développe. On s'attend ici à trouver la majeure partie du mycélium sur les surfaces externes des grains. Seule une translocation mineure se produit vers d'autres parties du grain. Jusqu'ici, on n'a trouvé qu'une concentration faible de DON dans la farine.

Les différents leviers pour maîtriser le DON sur blé tendre



Source : ARVALIS - Institut du végétal 2009

Outils de gestion existants

Plusieurs types d'outils existent, selon qu'il s'agit d'aide à l'analyse du risque, de prévention et de maîtrise du risque ou d'autocontrôle.

Analyse du risque

- ➔ Outils prédictifs avant récolte (ex : grille d'évaluation du risque DON à la parcelle)
- ➔ Enquêtes récolte
- ➔ Enquêtes parcellaires FranceAgriMer/ARVALIS
- ➔ Plans de surveillance

Prévention et maîtrise du risque : Bonnes pratiques (GBPH Production Grandes Cultures)

- ➔ Classements de sensibilité variétale
- ➔ Itinéraire technique (précédent cultural, gestion des résidus, travail du sol, protection phytosanitaire...)

Autocontrôle

- ➔ Echantillonnage
- ➔ Kits ELISA, bandelettes

Réglementation

Niveaux maximaux dans le maïs et les produits de maïs (produits alimentaires)

Règlement CE 1126/2007 du 28 septembre 2007, mettant à jour le règlement CE 1881/2006 fixant des niveaux maximaux pour certains contaminants dans les produits alimentaires pour ce qui est des toxines *Fusarium* dans le maïs et les produits de maïs.

Niveaux maximaux dans d'autres produits alimentaires : blé, blé dur, avoine, orge, etc.

Règlement CE 1881/2006 du 19 décembre 2006 fixant les niveaux maximaux de certains contaminants dans les produits alimentaires.

Prévention et réduction dans les céréales et les produits céréaliers

Règlement CE 583/2006 du 17 août 2006 concernant la prévention et la réduction des toxines de *Fusarium* dans les céréales et les produits céréaliers.

Niveaux maximaux dans l'alimentation animale

Règlement CE 576/2006 du 17 août 2006 sur la présence de déoxynivalénol, de zéaralénone, d'ochratoxine A, de T-2 et de HT-2 et de fumonisines dans des produits destinés à l'alimentation animale.

Dose quotidienne tolérable

Règlement CE 856/2005 du 6 juin 2005 amendant le règlement CE No 466/2001 concernant les toxines *Fusarium*.

En $\mu\text{g}/\text{kg}$	Alimentation humaine	DON
Céréales (hors maïs)	Brutes	1 250 Blé dur et avoine : 1 750
	Farine, semoule	750
	Pâtes sèches	750
	Pain, biscuits, pâtisseries, céréales petit déjeuner	500
	Aliment bébé	200
Maïs	Brut	1 750
	Fraction de mouture <500 microns	1 250
	Fraction de mouture >500 microns	750
	Céréales petit déjeuner, snacks	500
	Aliment bébé	200

	Maïs destinés à l'amidonnerie voie humide	Dérogation
--	---	------------

<i>En µg/kg</i>	Alimentation animale	DON
Céréales	Tout céréale et produit à base de céréales (sauf co-produits maïs)	8 000
	Co-produits maïs	12 000
Aliments	Bovins	
	- Veaux de moins de 4 mois	2 000
	- Vaches laitières	5 000
	- Autres bovins	5 000
	Ovins	
	- Agneaux	2 000
	- Autres ovins	2000
	Caprins	
- Chevreaux	2 000	
- Autres caprins	2 000	
Porcs		
- Porcelets et cochettes	900	
- Truies et porcs charcutiers	900	
Volailles		
		5 000
Poissons		5 000
Equidés, lapins et animaux familiers		5 000

Mycotoxines

De quoi s'agit-il ?

Les fumonisines sont un groupe d'au moins 15 mycotoxines étroitement liées. La plus importante est la fumonisine B1 (FB1). On les retrouve souvent dans le maïs, mais leur présence a été signalée dans les pâtes et la bière. Il s'agit de mycotoxines polaires produites par plusieurs espèces de *Fusarium* telles que le *F. verticillioides* et le *F. proliferatum*. Leurs structures chimiques se basent sur une longue chaîne hydrocarbonée hydroxylée, comportant des groupes méthyle et amino. Deux groupes hydroxyles sont estérifiés avec des acides tricarbalyles (propane-1, 2, 3-tricarboxylique). Les fumonisines B2 ne comportent pas de groupe hydroxyle en position 10, par rapport aux fumonisines B1. Les fumonisines sont insolubles dans la plupart des solvants organiques tels que le chloroforme ou l'hexane, ce qui explique la difficulté à les détecter malgré le fait que l'on connaisse leurs effets sur les chevaux depuis plus d'un siècle.

La présence de FB1 dans les céréales a été associée aux taux élevés de cancer de l'œsophage chez l'homme en Afrique, en Italie du nord, en Iran, dans le sud-est des États-Unis et au cancer du foie dans certaines régions de Chine (Yazar et Omurtag, 2008). Le Centre international de recherche sur le cancer a classé les fumonisines dans le groupe 2B (probablement cancérogènes).

Présence et fréquence

Les fumonisines présentes sur les céréales semblent être produites quasi exclusivement au champ, sur maïs et sorgho par des espèces de *Fusarium* telles que *F. verticillioides* et *F. proliferatum*. Les facteurs de variation sont moins bien connus que ceux concernant les autres fusariotoxines. La présence importante de fumonisines est liée à des températures estivales élevées. Les maïs cultivés dans le nord de la France sont potentiellement moins contaminés par les fumonisines que ceux cultivés au sud. Les insectes ravageurs de culture, comme la pyrale, induisent des lésions dans les tiges et épis de maïs, augmentant le risque de contamination.

En semoulerie de maïs, on observe une forte contamination des sons alors que les autres fractions ont des teneurs inférieures. La répartition de la FB2 dans le grain est identique à celle de la FB1. Les fumonisines étant thermostables, elles persistent dans les produits alimentaires transformés à base de maïs.

Moyens de lutte existants

- Les moyens de lutte contre les champignons restent la prévention au champ par des traitements fongicides.
- Il faut éviter la présence de « foreurs » (pyrale) qui vont constituer des portes d'entrée pour les *Fusarium* producteurs de fumonisines.

Réglementation

Teneurs maximales dans le maïs et les produits à base de maïs (denrées alimentaires)

Règlement (CE) 1126/2007 DE LA COMMISSION du 28 septembre 2007 modifiant le règlement (CE) n° 1881/2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires en ce qui concerne les toxines du *Fusarium* dans le maïs et les produits à base de maïs.

Prévention et réduction dans les céréales et produits céréaliers

Recommandation (2006/583/CE) du 17 août 2006 sur la prévention et la réduction des toxines du *Fusarium* dans les céréales et produits céréaliers.

Teneurs maximales dans les produits destinés à l'alimentation animale

Recommandation (2006/576/EC) du 17 août 2006 concernant la présence de déoxynivalénol, de zéaralénone, d'ochratoxine A, des toxines T-2 et HT-2 et de fumonisines dans les produits destinés à l'alimentation animale.

Dose journalière tolérable

Règlement (CE) No 856/2005 du 6 juin 2005 modifiant le règlement (CE) n° 466/2001 en ce qui concerne les toxines du *Fusarium*.

<i>En µg/kg</i>	Alimentation humaine	Fumonisines B1+B2
Maïs	Brut	4000
	Fraction de mouture <500 microns	
	Fraction de mouture >500 microns	
	Céréales petit déjeuner, snacks	
	Aliment bébé	
	Maïs destinés à l'amidonnerie voie humide	Dérogation

<i>En µg/kg</i>	Alimentation humaine	Fumonisines B1+B2
Céréales	Tout céréale et produit à base de céréales (sauf co-produits maïs)	60 000 (maïs uniquement)
	Co-produits maïs	60 000
Aliments	Bovins	
	- Veaux de moins de 4 mois	20 000
	- Vaches laitières	50 000
	- Autres bovins	50 000
	Ovins	
	- Agneaux	20 000
- Autres ovins	20 000	
Caprins	- Chevreaux	20 000
	- Autres caprins	50 000

	Porcs	
	- Porcelets et cochettes	5 000
	- Truies et porcs charcutiers	5 000
	Volailles	20 000
	Poissons	10 000
	Equidés, lapins et animaux familiers	5 000

De quoi s'agit-il ?

Les mycotoxines T2 et HT2 font partie du groupe des trichothécènes, produites principalement par des moisissures du type *Fusarium*. Celles-ci se développent sur les céréales au champ, surtout quand il fait humide et relativement froid pendant la floraison. Selon leurs fonctionnalités, cette famille de mycotoxines est divisée en quatre classes : A, B, C, D. En raison d'un C-H en position 7 et d'un groupement autre qu'un carbonyle (isovalérate dans le cas de T-2 et HT-2) en position 8, T2/HT2 appartiennent aux trichothécènes de la classe A.

Présence et fréquence

Les connaissances au sujet de ces mycotoxines sont encore lacunaires. Le champignon responsable, *Fusarium langsethiae*, découvert il y a quelques années, n'entraîne pas forcément de symptôme sur céréales. L'avoine est l'espèce la plus sensible. L'orge, principalement les variétés de printemps, et le blé sont également touchés.

Outils de gestion existants

Plusieurs types d'outils existent, selon qu'il s'agit d'aide à l'analyse du risque, de prévention et de maîtrise du risque ou d'autocontrôle.

Analyse du risque

- Enquêtes parcellaires
- Plans de surveillance

Prévention et maîtrise du risque

- Bonnes pratiques (GBPH)

Réglementation

Des normes officielles n'ont toujours pas été fixées pour les teneurs en T-2 et HT-2 dans les aliments. Cependant, la recommandation 2013/165 sur les toxines T-2 et HT-2 a été publiée au Journal Officiel de l'Union Européenne le 4 avril 2013.

Le texte incite également, en cas de dépassements répétés de ces niveaux indicatifs, d'enquêter sur les facteurs conduisant à la présence de toxines T-2 et HT-2.

Niveaux indicatifs pour les céréales et les produits à base de céréales⁽¹⁾ :

	Niveaux indicatifs pour somme des toxines T2+HT2 (µg/kg)
Céréales brutes	
Orge et maïs	200
Avoine (non décortiquée)	1000
Blé, seigle et autres céréales	100

Céréales pour consommation humaine directe⁽¹⁾

Avoine	200
Maïs	100
Autres céréales	50

Produits céréaliers destinés à la consommation humaine

Avoine : sons, flocons	200
Sons de céréales (excepté ceux d'avoine), produits de mouture d'avoine (excepté les sons et les flocons), produits de mouture de maïs	100
Produits de mouture des autres céréales	50
Céréales pour petit-déjeuner, y compris les flocons	75
Pain, pâtisseries, biscuits, snacks, pâtes	25
Produits céréaliers pour nourrissons et jeunes enfants	15

Produits céréaliers et aliments composés destinés à la consommation animale⁽²⁾

Produits de mouture d'avoine	1000
Autres produits céréaliers	500
Aliments composés, exceptés pour les chats ⁽³⁾	250

(1) à l'exception du riz et des produits à base de riz

(2) les niveaux indicatifs se rapportent à une humidité de 12 %

(3) Les données collectées à ce jour ne permettent pas de définir de valeur indicative pour les chats mais celle-ci sera inférieure à 250µg/kg.

De quoi s'agit-il ?

La zéaralénone est un composé cristallin blanc, insoluble dans l'eau, mais soluble dans des solvants organiques divers. Cette toxine est un composé stable tant pendant l'entreposage que pendant la mouture, le traitement et la cuisson de nourriture. Elle ne se dégrade pas sous l'effet de températures élevées.

Conformément à sa structure, la ZEA est en mesure d'établir une liaison aux récepteurs d'œstrogènes mammifères. C'est ainsi que la ZEA induit des effets œstrogéniques sur les mammifères et perturbe la conception, l'ovulation, l'implantation, le développement et la viabilité du fœtus. Outre son activité œstrogénique, la ZEA possède également une activité anabolisante.

Présence et fréquence

La zéaralénone est une mycotoxine produite par plusieurs espèces de moisissures du genre *Fusarium* se développant dans les céréales, principalement au champ, pendant la floraison. La croissance et la production de toxines peuvent également se produire lors du stockage après récolte dans des conditions d'entreposage médiocres (humidité > 22 %). Les principales espèces de *Fusarium* productrices appartiennent aux genres *graminearum*, *culmorum*, *equiseti*. Toutes les souches ne sont pas productrices de zéaralénone.

Parce que les spores de *Fusarium* sont omniprésentes, les céréales comme l'orge, l'avoine, le blé, le riz, le maïs sont susceptibles de faire l'objet d'une contamination par la zéaralénone. Celle-ci se produit tout à la fois dans les zones climatiques tempérées et plus chaudes.

Réglementation

Niveaux maximaux dans les produits alimentaires : blé, blé dur ambré, avoine, orge, maïs, nourriture pour nourrissons

Réglementation (CE) No 1126/2007 du 28 septembre 2007, mettant à jour la Réglementation (CE) No 1881/2006 fixant des niveaux maximaux pour certains contaminants dans les produits alimentaires pour ce qui est des toxines *Fusarium* dans le maïs et les produits de maïs.

Réglementation (CE) No 1881/2006 du 19 décembre 2006 fixant les niveaux maximaux de certains contaminants dans les produits alimentaires.

En µg/kg	Alimentation humaine	ZEA
Céréales (hors maïs)	Brutes	100
	Farine, semoule	75
	Pâtes sèches	-
	Pain, biscuits, pâtisseries, céréales petit déjeuner	50
	Aliment bébé	20

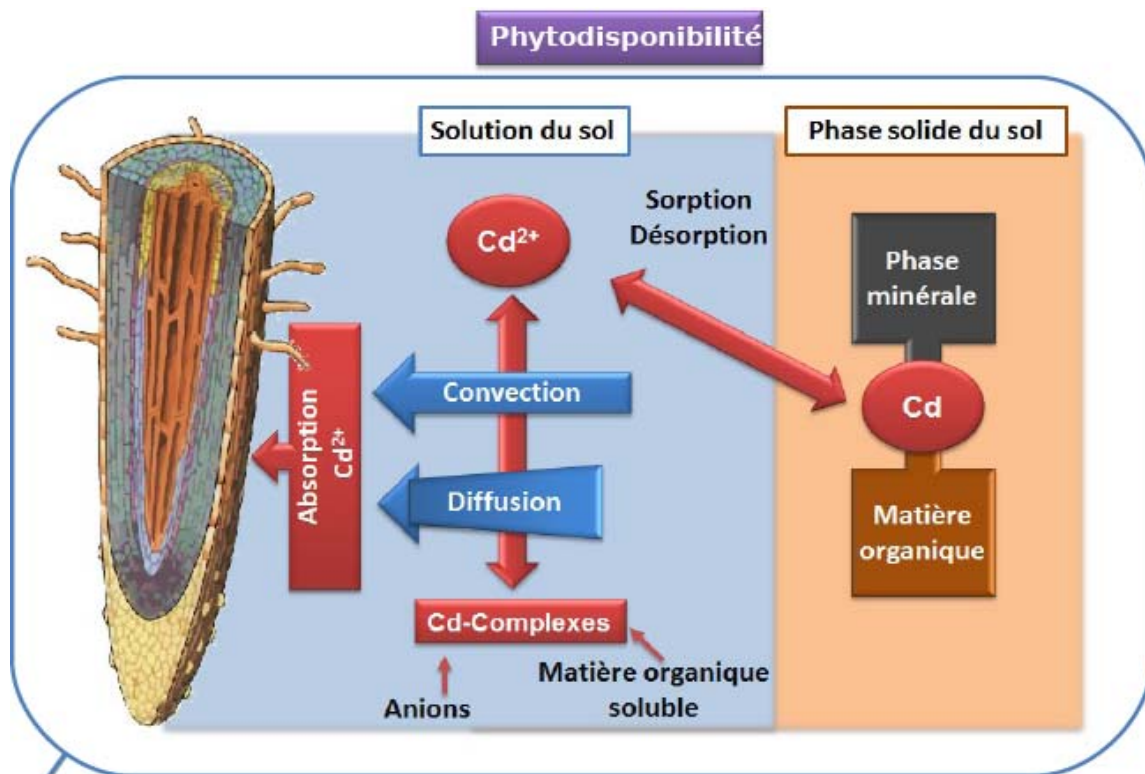
Maïs	Brut	350
	Fraction de mouture <500 microns	300
	Fraction de mouture >500 microns	200
	Céréales petit déjeuner, snacks	100
	Aliment bébé	20
	Maïs destinés à l'amidonnerie voie humide	Dérogation

Mycotoxines

<i>En µg/kg</i>	Alimentation animale	ZEA
Céréales	Tout céréale et produit à base de céréales (sauf co-produits maïs)	2 000
	Co-produits maïs	3 000
Aliments	Bovins	
	- Veaux de moins de 4 mois	500
	- Vaches laitières	500
	- Autres bovins	-
	Ovins	
	- Agneaux	500
	- Autres ovins	500
	Caprins	
- Chevreaux	2 000	
- Autres caprins	2 000	
Porcs		
- Porcelets et cochettes	100	
- Truies et porcs charcutiers	250	
Volailles		
	-	
Poissons		
	-	
Equidés, lapins et animaux familiers		
	-	

De quoi s'agit-il ?

La **phytodisponibilité** d'un élément est définie comme la quantité d'élément qui peut être prélevée par la plante durant son développement. Elle résulte de processus successifs qui contribuent au transfert de l'élément de la phase solide du sol aux tissus de la plante : l'offre du sol, le transport vers les racines, le prélèvement par les racines, le transport de l'élément vers les différents organes végétaux.



Exemple des processus de phytodisponibilité : exemple du Cadmium

Facteurs

La phytodisponibilité est sous l'influence de facteurs liés au **sol** (pH, potentiel d'oxydo-réduction, capacité d'échange cationique), à la **plante** (espèce, variété, stade de développement, excrétions racinaires) et aux **micro-organismes du sol** (activité biologique), au **climat** (température, humidité), aux **techniques culturales**, aux **caractéristiques de l'élément** et aux **interactions entre éléments**. D'une façon générale, les teneurs sont plus importantes dans les organes végétatifs (feuilles et tiges) que dans les organes reproducteurs (grains et fruits). Cette répartition est aussi fonction de l'espèce végétale.

Parmi les facteurs liés au sol, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction et la capacité d'échange cationique sont les plus importants. La modification de ces facteurs influe notamment sur l'offre du sol en changeant la forme chimique des éléments traces.

Pour une même offre du sol, différentes plantes ne prélèvent pas les mêmes quantités d'éléments-traces métalliques. Il existe un effet espèce végétale, avec des espèces qui accumulent certains éléments traces métalliques et d'autres qui ne les prélèvent que peu. De la même façon, il existe un effet variété.

Enfin, l'âge de la plante et son stade de développement ont une importance.

Notons qu'offre du sol et demande de la plante ne sont pas totalement indépendantes. En particulier, la plante peut modifier l'offre du sol en changeant, par exsudation métallique de composés divers (protons, molécules organiques complexantes par exemple), les conditions physico-chimiques qui régissent la solubilité de l'élément sur la phase solide et sa spéciation dans la solution. Cet effet en retour de la plante sur la disponibilité des éléments traces métalliques est actuellement difficile à quantifier, mais peut être considéré comme relativement faible dans la plupart des cas.

Les éléments-traces doivent être sous une forme disponible pour que les plantes puissent les prélever ou les plantes doivent présenter des mécanismes permettant de rendre les métaux disponibles. Les interactions entre les composants du sol jouent un rôle probablement plus important que les caractéristiques chimiques propres à chaque élément (à quelques exceptions près) dans la détermination du rôle du sol sur le prélèvement des éléments-traces par les plantes.



L'activité biologique se réfère aux organismes vivants du sol tels que les vers de terre, les insectes, les bactéries, les actinomycètes et les champignons. Ces organismes jouent un rôle primordial en ce qui concerne la fertilité et la stabilité structurale du sol.

Consulter les fiches

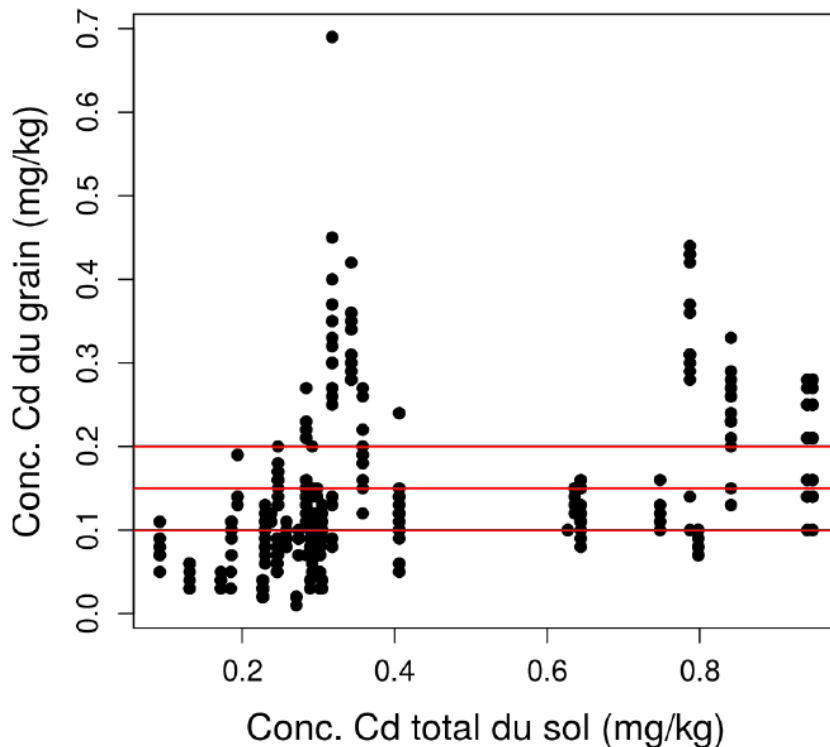
- **B1 : Sol et disponibilité pour la plante**
- **B2 : Plante**
- **B3 : Climat**
- **B4 : Pratiques culturales**
- **B5 : Voies de prélèvement et d'accumulation**

Pourquoi ?

La partition des éléments traces métalliques entre les phases solides et liquides dans le sol est fortement influencée par les propriétés du sol telles que le pH, la teneur en matière organique, la force ionique de la solution du sol, les oxydes de Mn et Fe, le potentiel Redox et la nature des surfaces de sorption du sol.

Les facteurs connus pour affecter la solubilité et la disponibilité des éléments traces métalliques pour les plantes incluent les caractéristiques chimiques des éléments traces métalliques, leurs teneurs, le pH, la capacité d'échange cationique, le potentiel Redox, la texture du sol, sa teneur en argile et en matière organique.

Seule, la concentration totale d'un élément trace dans le sol n'est donc pas un bon indicateur du risque de contamination des cultures.



Issu du programme Cadur (ARVALIS / INRA)



Cadur

pH

La solubilité d'un élément trace métallique dépend tout d'abord du pH. Un pH bas augmente généralement la phytodisponibilité des éléments traces métalliques, car l'ion H^+ a une plus grande affinité pour les charges négatives sur les colloïdes, et rentre alors en compétition avec les ions métalliques vis-à-vis de ces sites, ce qui induit un relâchement des éléments traces métalliques dans l'eau des pores du sol.

Plus le sol est acide, plus le transfert de Cd, Cu, Pb, Cr, Co, Zn, Hg, Ni, Tl, As vers la plante est important, car ces éléments sont plus solubles. En effet, les réactions de précipitation et d'adsorption augmentent avec le pH.

Potentiel Redox (Eh)

Les conditions, lorsqu'elles sont soit réductrices (Eh faible : par exemple cas d'un sol hydromorphe, gorgé d'eau), soit oxydantes (Eh élevé : par exemple cas d'un sol bien aéré), ont un effet sur la solubilité des éléments et donc sur leur disponibilité pour les végétaux.

Cependant, il est difficile de dégager de grandes tendances, car de nombreux facteurs interagissent. Il en résulte que la disponibilité des éléments traces métalliques augmente ou diminue selon les cas avec le potentiel d'oxydo-réduction.

Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique est un paramètre global, qui représente la quantité maximale de cations de toutes sortes qu'un poids déterminé de sol est capable de retenir ou, autrement dit, le total des charges négatives du sol disponibles pour la fixation de cations métalliques ou d'ions H⁺. Pour les pays tempérés (telle que la France métropolitaine), les cations dissous dans la solution du sol sont attirés par des composants chargés négativement (principalement, les argiles, les oxydes de métaux et la matière organique qui sont les contributeurs les plus importants à la CEC du sol). Une CEC élevée veut dire que la possibilité de fixation sur les charges négatives augmente. Plus la CEC est élevée, plus les cations métalliques (Cd, Pb, Cr, Co, Zn, Hg, Cu, Tl) sont adsorbés ou complexés par les matières organiques, les argiles et les oxydes, donc moins assimilables par les plantes. C'est pourquoi la quantité et la nature des matières organiques, des argiles et des oxydes dans le sol conditionnent la disponibilité des éléments traces.

Les sols sableux permettent donc un transfert des éléments traces vers les plantes plus élevé que les sols plus lourds (plus argileux).

Pourquoi ?

Des végétaux d'espèces différentes, cultivés dans les mêmes conditions, n'absorbent pas les mêmes quantités d'ETM et ne les stockent pas dans les mêmes organes.

Espèce

Le prélèvement des ETM peut différer selon les différents génotypes de plantes, en relation avec la concentration externe de l'élément. Trois grandes stratégies existent :

- Certaines plantes dites « exclusives » prélèvent très peu les ETM, même quand ils sont à des concentrations élevées dans le sol. Ces plantes possèdent des barrières empêchant le prélèvement, mais quand les concentrations en ETM deviennent trop élevées, ces barrières perdent de leur efficacité, probablement à cause de l'action toxique des ETM, et le prélèvement augmente alors massivement.
- D'autres, dites « accumulatrices », présentent de fortes accumulations d'ETM même à de très faibles concentrations dans le sol.
- Les dernières, dites « indicatrices », ont des concentrations d'ETM dans leurs tissus qui reflètent la concentration de l'élément dans le sol et qui augmentent de façon linéaire avec elle.

Variété

Les différences de prélèvement et de répartition observées entre les espèces existent de la même façon entre les variétés d'une même espèce.

Il semblerait que les différences entre les variétés les plus accumulatrices et les variétés les moins accumulatrices s'expliquent par une compartimentation différente entre racines et parties aériennes ou par une différence de translocation de l'élément lors du remplissage du grain ou de la graine.

Ces différences ne semblent pas constantes en fonction des sols. Suivant l'espèce et les variétés considérées, elles peuvent varier d'un site à un autre ou d'une année à une autre lors d'études en plein champ.

Plusieurs pays ont déjà sélectionnés des variétés de blé dur ou de blé tendre à faible teneur en cadmium.



*Pour le blé, dans le cas du cadmium, des études ont été menées sur les mêmes parcelles expérimentales plusieurs années de suite. Pour une même variété et un même site, il apparaît très clairement des **différences d'accumulation de cadmium dans les grains entre les années, d'un facteur 2 à 3.***

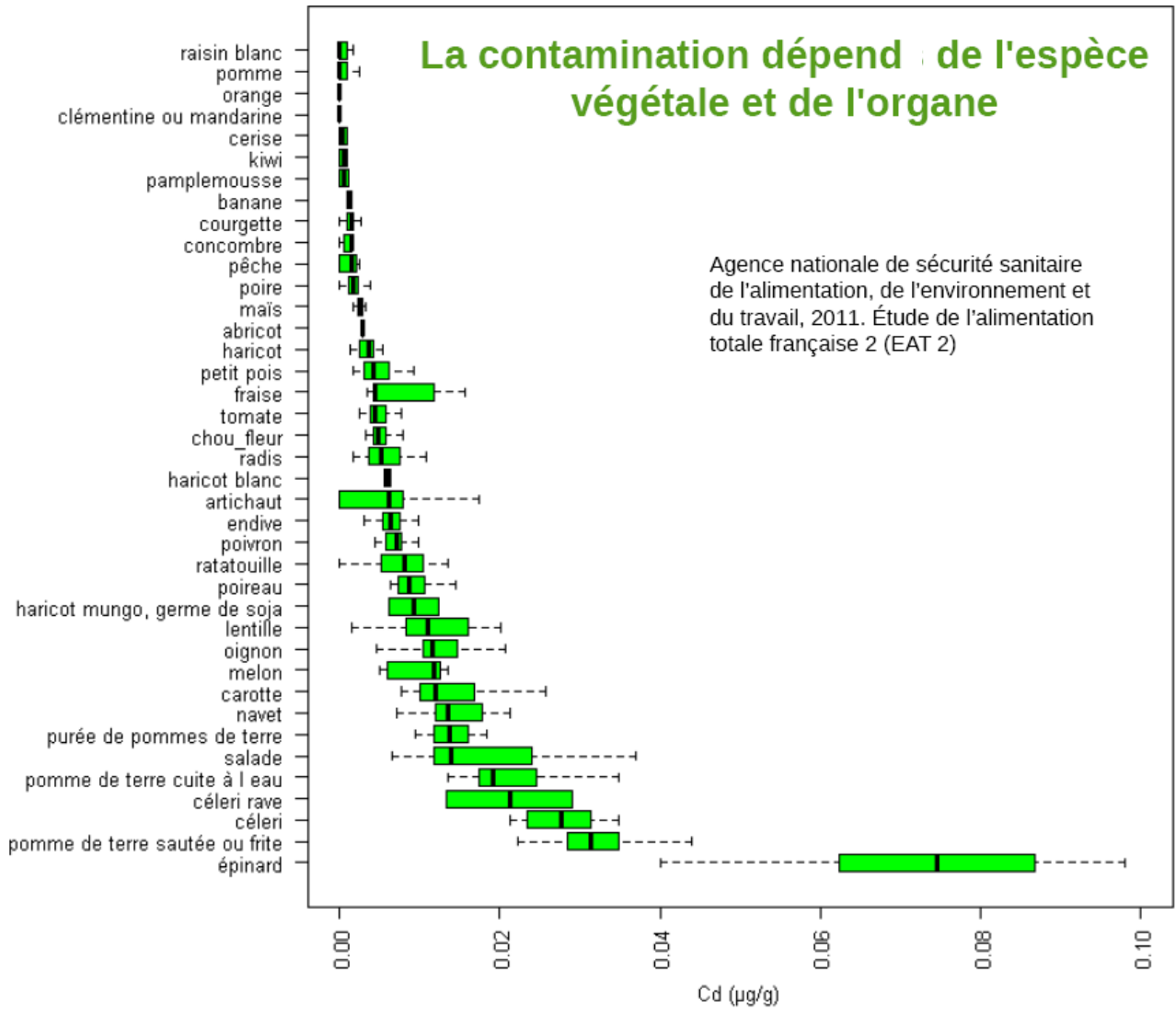
Age et stade de la plante

L'âge de la plante et son stade de développement ont une importance. La concentration de la plante en ETM diminue au cours de sa croissance.

Organe

Généralement, les légumes-feuilles (tels que épinards et laitues) accumulent plus que les grains de graminées et les légumes-racines, qui eux-mêmes accumulent plus que les fruits et les légumes-fruits.

ETM



Pourquoi ?

Les facteurs climatiques modifient l'offre du sol et la physiologie de la plante. Le prélèvement des ETM augmente avec la température, jusqu'à une température optimale. L'humidité du sol a également une influence sur le prélèvement et l'accumulation des ETM. Cette influence est indirecte (l'humidité joue sur l'enracinement de la plante, sa vitesse de croissance, l'activité biologique du sol et sur les conditions redox), elle est positive ou négative selon les cas.

Température

En plus de l'augmentation du prélèvement avec la température du sol, celle-ci a, par ailleurs, un effet sur le sol. Elle joue sur les constantes d'équilibre des réactions qui dirigent la spéciation des ETM dans le sol.

Elle a aussi un effet sur la physiologie des plantes. Par exemple, une augmentation de la température sur les feuilles de la plante provoque un surcroît de transpiration, donc une augmentation du flux de masse et, dans certains cas, le prélèvement. Elle provoque aussi la croissance de nouvelles racines.

Humidité

Elle intervient indirectement :

- en favorisant l'activité biologique, et donc la production de substances susceptibles de mobiliser les éléments,
- ou en modifiant le potentiel d'oxydo-réduction du sol (en général un excès d'humidité favorise des conditions réductrices),
- ou bien en influant sur la profondeur d'enracinement.

En années sèches, les racines descendent plus profondément dans le profil du sol et prélèvent moins d'ETM qu'en années humides si les éléments sont d'origine anthropique. À l'inverse, le prélèvement est plus important si les éléments ont une origine naturelle.



Pour les productions françaises de blé dur, l'effet pédoclimat expliquerait plus de 75% de la variabilité des teneurs en cadmium.

Pourquoi ?

Les techniques culturales modifient les conditions du milieu et agissent donc sur les facteurs liés au sol, à la plante et les facteurs climatiques qui contrôlent le prélèvement des ETM par la plante. Certaines pratiques, comme le travail du sol, agissent à plusieurs niveaux. Le choix du labour, du non-labour ou du travail superficiel du sol a de multiples conséquences sur l'état d'aération du sol, son pH, la profondeur d'enracinement des racines. Lors d'un semis direct par exemple, la quantité de racines qui reste en surface est plus importante que lors d'un labour profond, modifiant ainsi la quantité d'ETM prélevés, puisque la concentration en ETM en surface et en profondeur sont différentes.

Chaulage

Le pH a une forte influence sur la biodisponibilité des ETM. Le chaulage (apport d'amendements minéraux basiques à un sol pour lutter contre son acidité ou acidification) est donc une pratique qui peut limiter le passage des ETM en solution et leur accumulation dans la plante. De nombreuses études ont montré qu'une augmentation de pH suite à un chaulage conduisait à une diminution de la biodisponibilité et une diminution du prélèvement par les végétaux.

Les résultats sont clairs si on s'intéresse à des productions végétales de type « feuilles » telles que la laitue ou l'épinard. Par contre, pour les céréales, les résultats sont moins nets : la diminution de concentration dans les grains est soit faible soit non significative. De plus, il existe très peu d'études conduites en plein champ sur des sols agricoles non contaminés. La plupart des études ont été réalisées en pot, en conditions contrôlées, ou sur des sols contaminés, notamment suite à des apports de boues de station d'épuration. Le faible effet du chaulage sur la concentration dans les grains est soit la conséquence d'une forte régulation des flux d'ETM vers la graine, soit un prélèvement d'éléments dans les horizons profonds, non affectés par le chaulage.



Le pH du sol varie au cours de l'année : il est toujours plus élevé l'hiver et plus bas l'été. Cette variation est couramment de 0,5 unités de pH. Elle peut varier dans certaines situations jusqu'à 1 unité de pH, en particulier à la surface du sol.

Apport de matières organiques

L'apport de matières organiques va avoir une influence sur la mobilité des ETM et va avoir tendance à diminuer sa biodisponibilité. Ainsi, des apports de fumiers, lisiers ou boues vont contribuer à piéger les éléments. Là encore, les essais en plein champ sont rares.

Apport de fertilisants

L'apport de phosphate au sol va conduire à un apport de cadmium, puisque celui-ci est présent en impuretés dans ce fertilisant, en quantité non négligeable et dépendant de la provenance de la roche phosphatée. Un apport répété de phosphate conduit à une augmentation modérée de la concentration en cadmium dans les sols. Par contre, les effets sur les végétaux sont moins clairs.

L'apport de fertilisant azoté ou phosphaté peut conduire à une augmentation du prélèvement d'ETM liée à une augmentation de la mobilité du métal sous l'effet de l'augmentation de la force ionique en solution ou d'une modification du pH du sol.

En bref

Toutes les pratiques qui vont avoir un effet, direct ou indirect, sur le pH, la teneur en matières organiques ou la force ionique de la solution du sol peuvent induire un effet sur le prélèvement d'ETM par le végétal. Ainsi, la nature des rotations, le labour, l'enfouissement de résidus de culture peuvent conduire à des effets indirects.

De même l'apport de soufre en tant que fongicide conduit à l'acidification du sol et à un transfert accru des éléments traces vers les végétaux.

Les plantes sont exposées de deux façons aux éléments traces : par les parties aériennes et par les racines.

Ils peuvent y pénétrer par les parties aériennes (feuilles, tiges, fruits), à partir de particules en suspension dans l'air ou de composés dissous dans l'eau de pluie ou d'irrigation.

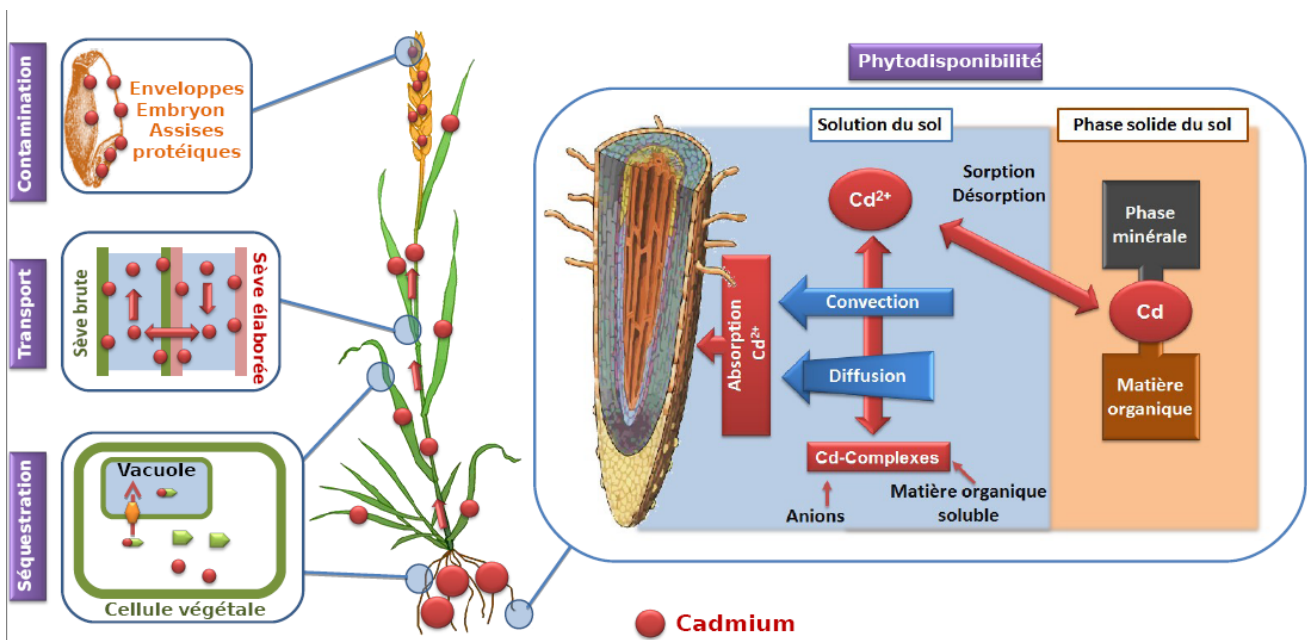
Ils peuvent pénétrer par les **racines** à partir du sol.

Une fois prélevés par la plante, les éléments traces peuvent être accumulés et ne pas circuler dans la plante, ou alors être transportés du lieu de l'absorption vers un autre organe végétal.

Voie racinaire

La disponibilité des éléments traces est dépendante du temps, de la plante, de la biomasse et des autres composantes du sol. Seule une petite fraction de la teneur totale en cet élément dans le sol est disponible pour les racines des plantes et cette fraction montre généralement une variabilité spatio-temporelle bien plus importante que la concentration en élément total. La phase liquide est essentielle pour que les ions puissent se déplacer vers la surface des racines ; la fraction d'élément dans la solution est celle disponible.

Les mécanismes d'absorption des éléments traces par les racines de plantes sont encore mal compris, mais il apparaît que la plupart des prélèvements d'éléments traces par les plantes impliquent seulement des espèces ioniques libres.



Le transfert sol-plante : exemple du Cadmium

Les éléments traces de la solution du sol sont transportés vers la rhizosphère, qui est la zone de sol proche de la racine, en interaction avec elle. Une fois dans la rhizosphère, ils sont prélevés par la racine.

Les cellules végétales sont constituées d'une paroi, perméable à la solution du sol, entourant la membrane plasmique. La plante prélève essentiellement l'élément sous forme ionique.

ETM

La paroi peut être considérée comme une éponge pouvant fixer les éléments traces, mais qui ne fait pas partie du milieu intérieur de la plante.

Une partie des éléments traces peut pénétrer réellement dans les cellules des racines par des voies plus ou moins spécifiques et plus ou moins régulées. Dans ce cas, il s'agit d'une réelle absorption, qui permet aux éléments traces de migrer dans le végétal vers d'autres organes.

Le Cd, élément non essentiel, semble pénétrer dans les cellules racinaires en empruntant les voies d'autres cations, comme les transporteurs du Fe, du Mn, du Zn.

La simple fixation dans la paroi et l'absorption sont regroupées sous le terme général de « prélèvement » par la plante.

Pour la plupart des espèces végétales, les racines retiennent la majeure partie des éléments traces prélevés, ce qui explique que les teneurs y soient souvent plus élevées que celles dans les parties aériennes.

Une partie est transportée par les parois cellulaires, puis entre dans les cellules et circule de cellule en cellule (voie symplasmique) jusqu'aux vaisseaux conducteurs de la sève brute, qui les emmènent vers les parties aériennes. On observe soit une réduction des teneurs en éléments traces de la racine à la graine (cas du Ni ou du Pb), soit des concentrations homogènes dans toute la plante, voire croissantes de la racine à certains organes.

Les éléments traces sont distribués dans les différents organes, puis peuvent être remobilisés, c'est-à-dire changer d'organe ultérieurement en passant par les vaisseaux conducteurs de sève élaborée, notamment selon les stades de développement de la plante. D'une façon générale, les teneurs en éléments traces sont supérieures dans les organes végétatifs (feuilles et tiges) que dans les organes reproducteurs (grains et fruits).

La répartition des éléments traces au sein de la plante est étroitement liée à l'espèce végétale.

De la même façon, la variété est un facteur non négligeable dans la répartition des éléments traces entre les différents organes végétaux.

De fortes teneurs en éléments traces dans les végétaux ont deux conséquences :

- la première est une toxicité potentielle directe pour la plante (phytotoxicité), c'est-à-dire un dysfonctionnement pouvant aller jusqu'à une diminution du rendement et de la qualité industrielle des récoltes ;
- la seconde est une toxicité potentielle pour les animaux ou les hommes qui ingèrent les végétaux.



*Les éléments traces peuvent circuler dans la racine de deux façons : par la **voie symplasmique** (intérieur de la cellule) et par la **voie apoplasmique** (extérieur de la cellule).*

De quoi s'agit-il ?

Depuis 2001, ARVALIS-Institut du végétal a conduit des enquêtes chaque année auprès de producteurs de blé tendre, blé dur et maïs pour identifier les facteurs de risque en lien avec les techniques culturales. Elles ont permis de hiérarchiser les éléments en cause dans les contaminations de DON, zéaralénone et fumonisines.

Facteurs

Les contaminations en DON sont étroitement liées au contexte pédoclimatique de la parcelle qui explique à lui seul près de 60% de la variabilité des teneurs en DON. La conduite de la culture n'en explique que 40% selon la céréale étudiée. Dans ce volet agronomique, la gestion des résidus du précédent est prépondérante sur le choix d'une variété résistante à l'accumulation de DON. Mais c'est la combinaison des facteurs qui permet de limiter le risque.

Le **climat** apparaît toujours comme le facteur de 1^{er} ordre pour chacun des champignons producteurs et pour leurs toxines associées.

Pour le DON et la zéaralénone, les facteurs prépondérants sont d'abord :

- la **date de récolte** et le **stade de maturité**,
- puis la **sensibilité variétale**,
- et enfin la **gestion des résidus des précédents culturaux**.

Pour les fumonisines, ce sont d'abord :

- les **insectes foreurs** sur tige et épi (pyrales, sésamies, héliothis),
- puis le **stress hydrique**, les **blessures**, **fissures** et **pathogènes** sur épi qui favorisent l'entrée du *Fusarium moniliforme*, extrêmement opportuniste et concurrentiel,
- interviennent enfin la **sensibilité des variétés** à *F. moniliforme* et la **gestion des résidus du précédent**.



Deux grands types d'outils ont été développés : **les grilles agronomiques d'évaluation du risque** et **les modèles agro-climatiques**. Les grilles qui sont alimentées annuellement par les études expérimentales sur les variétés et l'évaluation des fongicides sont à destination large et peuvent être utilisées pour cibler le conseil et sensibiliser les adhérents. Les modèles de prévision quant à eux sont à destination des collecteurs pour une gestion globale du risque au champ grâce au positionnement de la date de traitement au silo via la prévision à la parcelle du risque DON.

Consulter les fiches

- **B7 : Contexte climatique**
- **B8 : Gestion des résidus de culture**
- **B9 : Résistance variétale**
- **C1 : Grilles agronomiques d'évaluation du risque et modèles agro-climatiques**

Pourquoi ?

Parmi les principaux facteurs de risque, le climat apparaît toujours comme le facteur de 1^{er} ordre pour chacun des champignons producteurs et leurs toxines associées : *Fusarium graminearum* pour DON et zéaralénone, *Fusarium* « moniliforme » regroupant *F. verticillioides* et *F. proliferatum* pour les fumonisines.

Un climat humide à partir de l'épiaison du blé et pendant la floraison (+/- 7 jours) favorise le développement des fusarioses des épis (la présence de pollen favorise en effet la contamination). Une forte humidité ou des épisodes pluvieux autour du stade floraison augmente considérablement le risque. Il est donc primordial d'observer le climat à l'approche de la floraison pour évaluer au mieux le risque fusariose final.

Minimiser le risque fusariose

Il convient de ne pas irriguer le blé pendant une durée de 8 jours après la sortie des étamines.



La nature du précédent cultural et le type de travail du sol ont également une grande importance dans la maîtrise du risque d'infection par les fusarioses.

Pourquoi ?

Pour implanter un blé derrière un maïs grain, la gestion des résidus de ce dernier est importante, en particulier si aucun labour n'est réalisé, pour assurer une bonne levée du blé et réduire les risques de contamination des grains de blé par le DON. Dans le cas d'une succession maïs/maïs, le broyage fin des résidus de récolte permet de lutter en préventif contre les insectes foreurs tels que les pyrales et les sésamies.

Broyer et enfouir les résidus de maïs

Plus la gestion des résidus est fine (broyage et enfouissement), meilleure est la qualité sanitaire, car moins les résidus seront présents sous la culture de blé, réduisant ainsi le risque de contamination des épis par les ascospores de *Fusarium graminearum*, un des agents responsables de la fusariose des épis et de la production de DON.

Le broyage efficace des cannes immédiatement après la récolte et une incorporation précoce superficielle par déchaumage sous forme de mulch facilitent la décomposition de la matière organique et réduisent les conditions d'hibernation des pyrales et sésamies.

Ainsi, les systèmes en non-labour sont les plus exposés car ils laissent en surface des résidus potentiellement contaminés.



*Les blés en semis direct sont en moyenne **5 fois** plus contaminés que les blés issus de parcelles ayant été labourées avec un broyage préalable des résidus.*

*Le broyage des cannes après le semis direct permet de **diviser par 2** les teneurs en DON par rapport à un semis direct sans broyage.*

Pourquoi ?

Le choix des variétés participe à la limitation des risques de fusarioses en situation de potentiel infectieux (climat, itinéraire technique).

Un levier de choix technique

Des différences variétales vis-à-vis de la résistance à la fusariose et de l'accumulation en mycotoxines existent.

Aucune variété de blé tendre n'est totalement résistante à la fusariose de l'épi. Bien que le nombre de variétés peu sensibles augmente, il reste limité. Du fait de ce nombre restreint, le choix de variétés de blé tendre peu sensibles à la fusariose n'est indispensable que dans des situations agronomiques à risque, c'est-à-dire derrière un maïs ou un sorgho dont les résidus ne sont pas enfouis.

Même si l'ensemble des variétés de blé dur reste sensible vis-à-vis de la fusariose et de l'accumulation en mycotoxines, les différences variétales doivent être utilisées pour réduire les risques.

De quoi s'agit-il ?

Les enquêtes parcellaires mises en place par ARVALIS-Institut du végétal avec des partenaires économiques depuis 2001 ont permis de hiérarchiser les principaux facteurs de risque.

A partir d'un ensemble de données agronomiques et climatiques couplées à l'analyse d'échantillons de grains en toxines, des grilles d'évaluation du risque pour le blé tendre, le blé dur et le maïs ont été construits.

Grilles agronomiques d'évaluation du risque DON sur blés





Ces observations ont permis de développer deux grilles d'évaluation du risque DON à la parcelle sur blés

L'interaction entre le risque climatique et le risque agronomique est à prendre en compte pour décider de la nécessité d'un traitement fongicide ou non.

Les grilles blé tendre et blé dur permettent de piloter l'éventuel traitement fongicide floraison selon les conditions agronomiques et climatiques de l'année. Compte tenu de la sensibilité de l'espèce et de l'impact possible sur la qualité, ce sont les parcelles de blé dur qui doivent être ciblées en priorité pour une intervention fongicide.

Ces grilles combinent les facteurs agronomiques et climatiques identifiés pour aboutir à un niveau de risque. A chaque niveau de risque est associée une préconisation, notamment en termes de traitement fongicide.

Grille d'évaluation du risque d'accumulation du DON dans le grain de blé tendre lié à la fusariose sur épi (*F. graminearum* et *F. culmorum*)

Gestion des résidus*	Sensibilité variétale	Risque	Pluie à la floraison			
			<10	10-40	>40	
 Céréales à paille, colza, lin, pois, féverole, tournesol	Labour ou résidus enfouis	Peu sensibles	1			
		Moyennement sensibles	2			
		Sensibles	3			T**
	Techniques sans labour ou résidus en surface	Peu sensibles	2			
		Moyennement sensibles	3			T
		Sensibles	3			T
 Betteraves, pomme de terre, soja, autres	Labour ou résidus enfouis	Peu sensibles	2			
		Moyennement sensibles	3			
		Sensibles	3			T
	Techniques sans labour ou résidus en surface	Peu sensibles	2			
		Moyennement sensibles	3			
		Sensibles	4		T	T
 Maïs et sorgho fourrages	Labour ou résidus enfouis	Peu sensibles	2			
		Moyennement sensibles	3			
		Sensibles	4			
	Techniques sans labour ou résidus en surface	Peu sensibles	4		T	T
		Moyennement sensibles	5		T	T
		Sensibles	6	T	T	T
 Maïs et sorgho grains	Labour ou résidus enfouis	Peu sensibles	2			
		Moyennement sensibles	3			T
		Sensibles	4		T	T
	Techniques sans labour ou résidus en surface	Peu sensibles	5		T	T
		Moyennement sensibles	6	T	T	T
		Sensibles	7	T	T	T

ARVALIS-Institut du végétal 2011

La grille estime le risque de 1, risque DON le plus faible, à 7, risque DON le plus fort. Une variété est dite sensible si sa note d'accumulation en DON est inférieure ou égale à 3,5 et elle est dite peu sensible si cette note est supérieure à 5,5.
T = parcelles conseillées au traitement.

Recommandations associées à chaque niveau de risque :

1 et 2 : Le risque fusariose est minimum et présage d'une bonne qualité sanitaire du grain vis-à-vis de la teneur en DON. Pas de traitement spécifique vis-à-vis des fusarioses quelles que soient les conditions climatiques.

3 : Le risque peut être encore minimisé en choisissant une variété moins sensible. Traiter spécifiquement vis-à-vis des fusarioses en cas de climat humide (cumul de pluie > 40 mm pendant la période entourant la floraison).

4 et 5 : Il est préférable d'implanter une variété moins sensible ou de réaliser un labour pour revenir à un niveau de risque inférieur. A défaut, effectuer un broyage le plus fin possible et une incorporation des résidus rapidement après la récolte. Pour ces deux niveaux de risque, envisager un traitement spécifique vis-à-vis des fusarioses, sauf si le climat est très sec pendant la période de floraison (cumul de pluie < 10 mm pendant les +/- 7 jours entourant la floraison).

6 et 7 : Modifier le système de culture pour revenir à un niveau de risque inférieur. Labourer ou réaliser un broyage le plus fin possible des résidus de culture avec une incorporation rapidement après la récolte sont les solutions techniques les plus efficaces et qui doivent être considérées avant toute autre solution. Choisir une variété peu sensible à la fusariose. Traiter systématiquement.

Grille d'évaluation blé dur du risque d'accumulation du DON dans le grain lié aux fusarioses sur épi

Système de culture		Sensibilité variétale	Niveau de risque
Autres précédents	Labour	Moyennement sensible	a
		Sensible	
		Très sensible	
	Non labour	Moyennement sensible	b
		Sensible	
		Très sensible	c
Maïs, sorgho grain (maïs fourrage)	Labour	Moyennement sensible	c (b)
		Sensible	
		Très sensible	
	Non labour	Moyennement sensible	d (c)
		Sensible	
		Très sensible	e (d)
			f (e)

La grille agronomique définit 6 niveaux de risque, allant de 'a' le plus faible à 'f' le plus fort. Pour les blés durs, il est préférable de traiter systématiquement contre cette maladie compte tenu de l'enjeu technico-économique sur la production (enjeux rendement, qualité technologique et sanitaire). La prise en compte de la grille permet d'identifier les situations pour lesquelles un traitement renforcé est justifié.

Grille agronomique d'évaluation du risque fusariotoxines sur maïs

Une grille d'évaluation du risque fusariotoxines sur maïs permettant d'identifier et de classer les itinéraires techniques selon un risque croissant d'apparition des mycotoxines a également été proposée. Elle combine les quatre principaux facteurs (présence d'insectes foreurs, date de récolte, choix variétal et gestion des résidus) et classe les parcelles des moins à risque aux plus à risque.

Grille d'évaluation du risque fusariotoxines sur maïs

Sans foreurs				Avec foreurs			
Date de récolte	Sensibilité des variétés à F. moniliforme / F. graminearum	Gestion des résidus	Classe de risque	Date de récolte	Sensibilité des variétés à F. moniliforme / F. graminearum	Gestion des résidus	Classe de risque
< 15/10	Autres variétés	Suffisante	A	< 15/10	Autres variétés	Suffisante	B
		Insuffisante	A			Insuffisante	C
	Les plus sensibles	Suffisante	B		Les plus sensibles	Suffisante	C
		Insuffisante	B			Insuffisante	D
15 au 31/10	Autres variétés	Suffisante	B	15 au 31/10	Autres variétés	Suffisante	B
		Insuffisante	B			Insuffisante	C
	Les plus sensibles	Suffisante	C		Les plus sensibles	Suffisante	C
		Insuffisante	C			Insuffisante	D
1 au 15/11	Autres variétés	Suffisante	B	1 au 15/11	Autres variétés	Suffisante	C
		Insuffisante	B			Insuffisante	C
	Les plus sensibles	Suffisante	C		Les plus sensibles	Suffisante	D
		Insuffisante	C			Insuffisante	E
> 15/11	Autres variétés	Suffisante	B	> 15/11	Autres variétés	Suffisante	D
		Insuffisante	C			Insuffisante	E
	Les plus sensibles	Suffisante	C		Les plus sensibles	Suffisante	E
		Insuffisante	D			Insuffisante	E

Modèles agro-climatiques

A partir des données d'enquête et de variables climatiques sélectionnées dans la bibliographie (variables combinant pluie et température autour de la floraison), deux modèles agro-climatiques de prévision des teneurs en DON ont été construits par ARVALIS-Institut du végétal et intégrés à un outil de gestion globale du risque DON à l'échelle de la collecte : Myco-LIS® Blé tendre – Blé dur.

De quoi s'agit-il ?

La qualité sanitaire (dont la teneur en mycotoxines) des céréales est un des éléments essentiels pour leur commercialisation. La détermination des teneurs en mycotoxines d'un lot de grains est utile pour leur orientation.

Les techniques analytiques pour détecter et quantifier les champignons et leurs mycotoxines sont en constante évolution pour suivre voire anticiper les nouveaux seuils réglementaires.

On distingue les méthodes dites rapides que sont les tests bandelettes utilisées comme outils de tri à la récolte ; les méthodes de référence accréditées qui correspondent aux analyses officielles et les méthodes intermédiaires que sont les tests immuno-enzymatiques (Elisa).

Méthodes rapides

L'intérêt principal d'une méthode rapide est de pouvoir obtenir sur le terrain une indication sur la présence de mycotoxines par rapport à un certain seuil, voire une estimation de leur teneur, et de prendre ainsi une décision immédiate. Ce sont des outils utiles pour une première appréciation, mais qui nécessitent confirmation par les méthodes de référence dans des cas limites ou pour une analyse précise.

Les méthodes les plus répandues sont les tests immuno-chromatographiques, appelés plus couramment « tests bandelettes ».

Méthodes accréditées

Ces méthodes sont de type chromatographique (GC : chromatographie en phase gazeuse, LC : chromatographie liquide, HPLC : chromatographie liquide haute performance, UPLC : chromatographie liquide ultra performance, UFLC : chromatographie liquide ultra rapide) ou par ultraviolet ou fluorimétrie ou spectrométrie de masse.

Méthodes intermédiaires

Il s'agit là des tests immuno-enzymatiques (tests Elisa) qui sont plus rapides et moins onéreux que la chromatographie liquide et ses dérivés. Ils sont cependant moins sensibles : les limites de détection et de quantification étant bien plus élevées.

Par rapport aux tests bandelettes, les méthodes intermédiaires sont plus précises et quantitatives mais moins rapides, tout en demandant davantage de technicité.

Ces tests exigent un équipement de laboratoire, à la portée de nombreux organismes stockeurs.



Limite de détection ? Limite de quantification ?

La limite de détection est la limite ultime d'une méthode ou d'un instrument, qui peut servir de seuil pour la présence ou l'absence de la molécule recherchée.

La limite de quantification est la concentration à partir de laquelle on va pouvoir fournir un résultat fiable.

**Critères de choix du laboratoire :**

- Est accrédité selon la norme NF EN ISO 17025 pour la méthode et le couple mycotoxine/produit
- Communique les limites de détection et de quantification de la méthode
- Participe à un circuit d'inter-comparaison
- Respecte les exigences des règlements CE N°401/2006 ou 152/2009 (respect des critères de performance)
- Corrige le résultat d'analyse du taux de récupération

Méthodes émergentes

La détection rapide de plusieurs toxines constitue un créneau porteur pour les nouvelles technologies de détection de mycotoxines.

Des « tigeltes » immunochimiques permettent une détection rapide basée sur l'interaction entre les anticorps spécifiques immobilisés sur une bande de membrane et des récepteurs anticorps coatés.

**Que sont des aptamères ?**

Il s'agit d'oligonucléotides (ADN) ou (ARN) sélectionnés à partir d'une banque aléatoire de séquences selon leur aptitude à reconnaître une cible. Ces aptamères présentent des affinités et spécificités comparables à celles des anticorps pour des molécules variées comme les mycotoxines. Ils ont l'avantage d'être synthétisés chimiquement et ne nécessitent pas l'utilisation d'animaux.

Le test *enzyme-linked immuno filtration assay* (ELIFA) est un outil jetable basé sur l'utilisation d'une membrane au travers de laquelle l'écoulement est dirigé parallèlement, analogue à la chromatographie sur couche mince.

Des biodétecteurs immunochimiques qui utilisent la résonance plasmonique de surface ou des biocapteurs de surface d'électrode de carbone ont été décrits.

Enfin, les *enzyme-linked aptamer assays* (ELAA) basés sur les molécules aptamères ont été utilisés.

La spectroscopie infrarouge est une méthode de dépistage viable, comme la transmittance proche infrarouge.

Le tableau ci-après présente une comparaison des méthodes.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Chromatographie gazeuse	Analyses multimycotoxines Bonne sensibilité Automatisable (<i>auto sampler</i>) Confirmation (détecteur MS)	Équipement très coûteux Nécessité d'une expertise spéciale, Nécessité de dérivation Problèmes d'interférences matricielles Courbe de calibration non linéaire, Décalage des réponses <i>drifting</i> Effets résiduels (<i>carry-over</i>) provenant d'échantillons précédent Reproductibilité variable Répétabilité variable
Chromatographie liquide sous haute pression	Bonne sensibilité Bonne sélectivité, Bonne répétabilité Confirmation Automatisable (<i>auto sampler</i>) Courte durée d'analyse Méthodes officielles disponibles	Équipement très coûteux Nécessité d'une expertise spéciale Nécessité de dérivation Nécessite la purification de l'échantillon
Chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse (LC/MS/MS)	Analyses multimycotoxines Bonne sélectivité Bonne sensibilité Confirmation Pas de dérivation Courte durée d'analyse Automatisable (<i>auto sampler</i>)	Très coûteux Nécessité d'une expertise spéciale, la sensibilité dépendant de la technique d'ionisation Effet matrice Standards internes nécessaires
<i>Enzyme-linked immunosorbent assay</i> (ELISA)	Simple préparation d'échantillon Équipements moins coûteux Sensibilité élevée Analyses simultanées d'échantillons Utilisation pour criblage Utilisation limitée de solvants organiques	Réactions croisées avec d'autres composés analogues Problèmes d'interférences matricielles Possibilité de faux positifs et/ou de faux négatifs Nécessité de confirmation par analyses LC
Tigettes <i>Lateral flow device/dipstick</i>	Rapide Pas de purification Pas d'équipement coûteux Facile à utiliser Pas de formation spécifique	Semi-quantitative (évaluation visuelle) Réactions croisées avec d'autres composés analogues Nécessité de validation pour des matrices additionnelles Nécessité de confirmation par analyses LC
<i>Fluorescence polarization immunoassay</i>	Rapide Pas de purification Méthode validée pour DON dans le blé	Réactions croisées avec d'autres composés analogues Problème d'interférences Nécessité de confirmation par analyses LC
Spectroscopie infrarouge (IR)	Rapide Mesures non destructives des analytes Pas d'extraction Pas de purification Opération facile	Équipements coûteux Nécessité de validation de modèle de calibration Connaissance des méthodes statistiques Faible sensibilité
Biodétecteurs (<i>Biosensors</i>)	Rapide Pas de purification	Réactions croisées avec d'autres composés analogues Nécessité de purification pour améliorer la sensibilité Reproductibilité et répétabilité variables

Huybrechts et al.

Pour en savoir plus

- Huybrechts et al., 2013. Méthodes analytiques de détermination des mycotoxines dans les produits agricoles : une revue. Cahiers Agricultures, 22, 202-215.
- Derrien et Bayouduh, 2008. Huybrechts et al., 2013. Polymères à empreintes moléculaires, intérêt et applications pour l'analyse. Spectra Analyse, 260, 30-34.
- Rapid Methods for Mycotoxin Detection. World Mycotoxin Journal., Editor: Hans P. van Egmond. 2014, vol.7, 4.