

Pratiques agricoles et sécurité sanitaire des aliments en production végétale

Thierry Doré, Marianne Le Bail, Philippe Verger

En Europe, on a redécouvert, à l'occasion de quelques crises aiguës, les questions de sécurité sanitaire des aliments. Il s'agit de bien plus qu'une simple mode : s'alimenter *de manière saine* (même si ce concept varie d'une culture à l'autre) fait partie des préoccupations permanentes. Toutefois la qualité des produits consommés devient secondaire face à la nécessité de satisfaction quantitative des besoins. C'est ce qui s'est passé lors de toutes les grandes crises alimentaires historiques [1] ; c'est ce qui arrive encore régulièrement dans les pays où l'irrégularité de la production vivrière entraîne une sous-alimentation, chronique ou épisodique, de tout ou partie des populations. D'autres priorités sanitaires y sont définies, pour tenter de pallier les difficultés les plus aiguës [2]. Symétriquement, dans les régions où l'abondance a éloigné l'inquiétude quant à l'approvisionnement en aliments, s'est mis en place un système visant à garantir une certaine sécurité

des produits pour le consommateur : développement de la chaîne du froid, mise en place de « dates limites de consommation » (DLC), innovations sur le plan des modes de conservation des produits (appertisation, surgélation, lyophilisation, etc.), établissement de procédures de traçabilité et de contrôle [3]. L'ensemble des règles et normes qui constituent ce système ont pu contribuer au sentiment que l'alimentation contemporaine était sans danger, tout au moins dans les pays développés. D'où l'ampleur de la réaction lorsque des liens avérés entre qualité des aliments et risque pour la santé humaine viennent démentir cette impression. Dans ces situations de crise, le consommateur s'en prend successivement ou simultanément aux pouvoirs publics, aux producteurs, aux industriels, à la grande distribution..., bref à tous les acteurs intervenant directement ou indirectement dans la chaîne alimentaire. Une meilleure identification des relations de cause à effet dans les problèmes de sécurité sanitaire des aliments permettrait de réduire la distance entre le risque ressenti par le consommateur [4] et le risque réel. Encore faut-il que les connaissances soient suffisantes pour établir ces relations. Nous proposons une analyse générale des relations entre les modes de production végétale et la qualité sanitaire des aliments, en deux étapes : (i) identification du rôle des pratiques agricoles dans les contaminations des produits végétaux ; (ii) réflexion sur l'évolution des pratiques dans l'optique d'une réduction des risques.

Pratiques agricoles et sécurité sanitaire des aliments

Types de substances ou d'organismes concernés

La sécurité sanitaire des aliments est altérée quand sont présents des organismes pathogènes ou des substances nocives, souvent regroupés sous le terme générique de « contaminants ». Nous conserverons par commodité ce terme, impropre dans la mesure où il renvoie aux notions de « souillure » et de « contact impur », qui sont étrangères à la présence, dans les aliments, de certaines substances considérées comme nocives (ou avérées telles) : par exemple le nitrate, qui est un produit du métabolisme normal des végétaux [5], ou encore certains métabolites secondaires comme l'acide cyanhydrique du manioc [6]. La nocivité n'est très généralement réelle qu'à partir d'une certaine concentration de la substance ou de l'organisme dans le produit (*encadré 1*) ; elle est parfois davantage supputée, voire redoutée, que démontrée.

La liste des substances indésirables évolue sous la triple avancée des connaissances toxicologiques, des techniques de dosage, et des modes de production/stockage/transformation. Ainsi, dans le domaine des contaminants naturels, les fumonisines produites par *Fusarium moniliforme* et *Fusarium proliferatum*

T. Doré : Ina PG, UMR d'agronomie Inra/Ina PG, 16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris Cedex 05. <dore@inapg.inra.fr>
M. Le Bail : Ina PG, UMR Inra/InaP/Sad-APT, 16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

P. Verger : Inra, Direction scientifique nutrition et sécurité des aliments, 147, rue de l'Université, 75338 Paris Cedex 07.

Tirés à part : T. Doré

Thèmes : Sécurité sanitaire ; Nutrition.

Fixation des normes sanitaires des produits agricoles

La dose toxicologique « admissible » (ou « tolérable ») d'un contaminant est la dose à laquelle un individu peut être exposé tout au long de sa vie sans effet néfaste sur sa santé (dose journalière tolérable ou DJT, dose hebdomadaire tolérable ou DHT). Cette DJT permet de déterminer les limites maximales de résidus dans les différentes catégories de denrées alimentaires. Par exemple, les médicaments vétérinaires et les produits phytosanitaires voient leur utilisation encadrée d'une part par leur dose efficace, d'autre part par leur dose résiduelle admise dans la denrée. Dans le cas des contaminants naturels (mycotoxines) ou des contaminants de l'environnement, la mise sur le marché des aliments est soumise au non dépassement de cette quantité acceptable en termes de santé publique. Dans le premier cas, le producteur devra adapter ses pratiques pour minimiser le développement des contaminants ; dans le second, il devra souvent adapter sa production aux contraintes environnementales (éviter la culture de légumes feuillus sur sols contaminés par les métaux lourds, par exemple). La mise en place de normes tient également compte de la notion de seuil ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), c'est-à-dire du niveau de contamination au-dessous duquel on ne peut pas descendre dans le cadre des règles de bonnes pratiques agricoles, présumées être respectées. En cas de dépassement de la dose toxicologique admissible (DJT, DHT), une révision de ces pratiques pourrait être demandée.

Par ailleurs, pour certaines catégories d'aliments symboliques ou sensibles, les réglementations peuvent aller au-delà de la protection du consommateur sur une base toxicologique et dans ce cas, la limite de quantification par dosage devient la dose de référence à éviter. Par exemple, dans les aliments pour bébés, les résidus de produits phytosanitaires doivent être non détectables dans le produit final même si leur utilisation est autorisée pendant la phase de production des matières premières.

Sur le plan international, les accords de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) de Marrakech, datant de 1994 (accords sanitaires et phytosanitaires - SPS - et *Technical Barriers to Trade* - TBT) imposent des arguments de santé publique fondés sur des observations scientifiques comme seule possibilité d'entrave aux importations. De plus, l'OMC reconnaît les normes produites par le *Codex Alimentarius* comme des référentiels pertinents en cas de litige entre deux pays. Tout cela a donné une nouvelle impulsion à la participation des pays aux travaux du *Codex* et, par conséquent, aux travaux scientifiques à l'appui des positions réglementaires nationales. Dans le domaine des contaminants, un grand nombre de normes sont en préparation, et la position de l'Union européenne et de la France consiste à proposer des normes réalistes mais suffisamment basses pour encourager les efforts des producteurs en matière d'application des bonnes pratiques agricoles. Un projet de directive européenne portant sur les teneurs maximales à respecter dans les denrées alimentaires et sur les méthodes analytiques de contrôle est actuellement en discussion.

Parallèlement, chaque année, les instances scientifiques internationales examinent les dossiers toxicologiques des contaminants récemment identifiés afin de déterminer les DJT ou DHT, c'est-à-dire pouvant être consommées par l'homme tout au long de sa vie sans risque pour sa santé. À titre d'exemple, le comité mixte FAO-OMS sur les additifs et les contaminants a examiné en février 2001 les dossiers toxicologiques de l'ochratoxine, de l'aflatoxine M1 et de la fumonisine B1.

recherche contre le cancer (CIRC) a classé ces toxines en 1993 comme possible cancérigènes pour l'homme (groupe 2B). Les fumonisines, et plus particulièrement la fumonisine B1, sont actuellement étudiées afin de déterminer les limites maximales tolérables dans les denrées alimentaires. De même, l'autorisation de mise sur le marché des « nouveaux aliments », en particulier des aliments constitués, ou issus, d'organismes génétiquement modifiés, est soumise à l'évaluation préalable de leur salubrité. Ce terme recouvre le risque « génétique » lié à la nature des séquences insérées, la toxicité des protéines étrangères exprimées, le risque allergique, les effets secondaires liés à l'activité de la protéine exprimée, et enfin les effets indirects, non attendus ou non identifiés, liés à l'insertion du transgène [7]. Enfin, pour prendre un dernier exemple, l'accroissement du nombre de molécules phytosanitaires utilisées est également générateur de nouvelles substances potentiellement présentes dans les produits finis.

Il est toutefois possible de dresser une liste provisoire des substances ou organismes actuellement en cause dans des questions de sécurité sanitaire des aliments issus de produits végétaux, en établissant quelques grandes catégories : les éléments traces (majoritairement métalliques, mais l'arsenic en fait aussi partie), les micro-polluants organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.), les résidus de produits phytosanitaires ou de leurs produits de dégradation, les constituants chimiques du métabolisme normal des végétaux (nitrates, métabolites secondaires contenant du cyanure, allergènes, etc.), les agents pathogènes pour l'homme (bactéries, virus, parasites, etc.), les mycotoxines produites par des champignons se développant sur les produits végétaux ou qui y sont mélangés, les transgènes et les métabolites qui en sont issus.

Les différentes étapes de la « contamination »

Indépendamment de sa nature, une matière indésirable retrouvée dans un produit d'origine végétale peut l'avoir contaminé à différentes étapes de la filière : production, stockage (incluant le transport), transformation (incluant le conditionnement).

sont des mycotoxines identifiées récemment par les toxicologues et les analystes. Isolées à partir de cultures de *Fusarium moniliforme*, elles sont neuro-

toxiques chez le cheval, ont des effets pulmonaires néfastes chez le porc et induisent des cancers hépatiques chez le rat. Le Centre international de

La transformation a une importance très variable en fonction de la nature des produits végétaux : faible dans le cas des produits consommés en frais (simple lavage et/ou épluchage), elle peut être au contraire complexe dans le cas de produits subissant plusieurs traitements successifs (cas de l'orge de brasserie par exemple, ou des produits dans la composition desquels entrent des extraits de végétaux comme la lécithine de soja). Les différentes phases de stockage peuvent également différer, en fonction du produit, en termes de durée comme de conditions (température, aération, etc.). C'est l'étape de production qui présente le plus de caractères communs influençant les contaminations quel que soit le produit : présence dans la quasi-totalité des cas du substrat (sol) et exposition à l'atmosphère ambiante (media possible des contaminants provenant entre autres des parcelles avoisinantes), aléas climatiques, risques d'exposition à des bio-agresseurs, capacités de migration des substances ou organismes pathogènes au sein même des plantes. Aucune production végétale n'échappe ainsi *a priori* aux risques liés à l'étape de production.

En l'absence d'évaluation quantifiée de la part respective des étapes de production, de stockage et de transformation dans la contamination des produits végétaux, une connaissance générale du fonctionnement des plantes et des différents types d'organismes ou substances incriminés permet d'établir un classement relatif du poids de ces différentes étapes pour chaque catégorie de contaminant évoquée ci-dessus (tableau 1). La phase de production est *a priori* concernée par la totalité des catégories. La phase de transformation peut être à l'origine de contaminations chroniques par des éléments traces métalliques des machines, de contaminations accidentelles par des agents pathogènes (par exemple, par le bacille botulique lors de l'appertisation), ou encore de la formation de nouveaux métabolites dans certaines conditions de transformation (production de nitrosamine par exemple, lors du processus de fabrication de la bière [8]). C'est aussi l'étape où peut être réalisée une certaine décontamination des produits (non représentée dans le tableau 1). L'étape de stockage peut être une phase de contamination privilégiée par des résidus de produits phytosanitaires, du fait des traitements réalisés pour éviter la dégradation des récoltes par des insectes ou moisissures ; c'est aussi une étape où les

mycotoxines peuvent être produites en grande quantité. Par ailleurs, en ce qui concerne la contamination par des transgènes, les opérations d'allotement réalisées pendant les étapes de stockage et de transport peuvent être à l'origine de mélanges accidentels entre lots sains et contaminés. Inversement, l'allotement peut être l'occasion d'une diminution des taux de contamination par mélange.

Modes de production et contaminations

La sensibilité de la contamination aux conditions de production est très variable d'une voie de contamination à l'autre. Il faut toutefois préciser que toute contamination survenant pendant la phase de production n'est pas forcément liée aux pratiques agricoles. En effet, l'environnement du peuplement végétal peut être lui-même contaminant, indépendamment de toute intervention agricole. C'est le cas, en particulier, en ce qui concerne les éléments traces : leur présence peut être liée à d'autres activités humaines comme la circulation automobile, l'industrie [9], ou à la présence naturelle (liée au fond géochimique) de ces éléments dans les sols [10].

L'introduction et la concentration des éléments nocifs ou pathogènes au cours de la production peuvent suivre des

cheminements très différents. Sont concernées les façons dont ces substances et organismes s'accumulent auprès des plantes cultivées, les pénètrent, se déposent, se concentrent. Les connaissances acquises sur le fonctionnement du champ cultivé permettent de distinguer quatre grandes voies de contamination pendant la phase de production : (i) la voie « passive » ; (ii) la voie « proliférative » ; (iii) la voie « métabolique » ; (iv) la voie « génétique ».

La voie « passive » (figure 1)

La voie passive concerne principalement les éléments traces, les micro-polluants organiques, les agents pathogènes et les produits phytosanitaires. Le passage en quantité plus ou moins importante de ces éléments du milieu dans lequel croissent les végétaux (sol et atmosphère) vers les organes récoltés, va dépendre d'un enchaînement de plusieurs facteurs : concentration dans le milieu, dépôt et/ou absorption racinaire ou pénétration aérienne, déplacement et concentration dans la plante. Dans le cas d'un dépôt direct sur les organes récoltés, la contamination peut se faire sans absorption, et sans concentration : c'est en particulier le cas pour les produits phytosanitaires organiques de synthèse appliqués sur le peuplement végétal. Dans ce cas, le rapport entre la fraction de produit appliqué qui atteint

Tableau 1

Hypothèses sur les contaminations possibles des produits végétaux par différents organismes et substances au cours de leur cycle de vie

	Production	Stockage et transport	Transformation
Éléments-traces	+	0	+
Micro-polluants organiques	+	0	0
Résidus de produits phytosanitaires	+	+	0
Constituants chimiques du métabolisme végétal ou leurs dérivés	+	0	+
Agents pathogènes	+	0	+
Mycotoxines	+	+	0
Gènes « polluants »	+	+	0

0 : contamination *a priori* peu probable.

+: contamination *a priori* possible.

Possible contamination pathways of vegetal foodstuffs by different chemicals or organisms during their life cycle

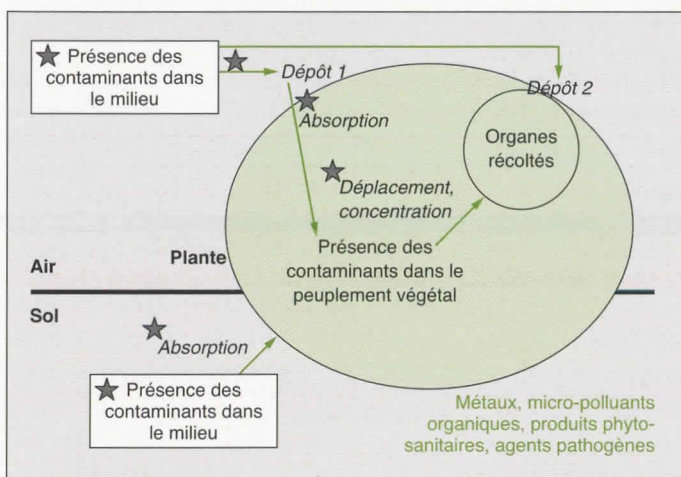


Figure 1. Description schématique de (la « voie de contamination passive »). Les principaux contaminants concernés sont inscrits en bas à droite de la figure. Les étoiles indiquent les étapes présentant une forte sensibilité aux techniques de production.

Figure 1. The “passive contamination pathway”. Major contaminants are listed on the lower right-hand corner; the stars indicate the more sensitive stages of the contamination pathway to cropping systems.

directement les organes et celle qui les évite est un élément déterminant du niveau de contamination. Pour les autres éléments, le sol constitue toujours un médiateur entre l'apport par les pratiques agricoles (sous forme de matières organiques – lisiers, fumiers, composts d'ordures ménagères, boues de station d'épuration, etc.) et la présence de ces éléments dans le peuplement végétal (à l'exception des traitements phytosanitaires par des produits minéraux comme l'emploi du cuivre comme antifongique sur la vigne). La concentration ou la disponibilité des éléments nocifs peuvent être influencées par le type de travail du sol pratiqué (qui modifie la répartition spatiale des éléments dans le volume de sol, avec des conséquences sur les capacités d'absorption racinaire), les pratiques d'entretien organique (qui déterminent pour partie les capacités d'adsorption du sol) [11], l'irrigation (qui peut provoquer un ruissellement ou une percolation entraînant la sortie d'une fraction des éléments toxiques du système, ou inversement y introduire des contaminants). Par ailleurs, les conditions de croissance et de développement du peuplement, influencées par de nombreuses techniques culturales, seront déterminantes pour le déroulement des phases d'absorption et de transfert dans la plante (cf. [12] pour les produits phytosanitaires et les micropolluants organiques, et [13] pour les agents pathogènes). L'ensemble de ces contaminants présentent des durées de persistance dans le milieu très variables : très longues pour les éléments traces, nettement plus courtes pour les produits phytosanitaires et pour les agents pathogènes (en général de l'ordre de quelques jours à quelques années).

La voie « proliférative » (figure 2)

La voie proliférative préside au développement des mycotoxines, contamination qui peut être importante ([14, 15] pour les mycotoxines fusariennes sur blé). L'augmentation de concentration en mycotoxines ne résulte pas d'un phénomène passif d'accumulation, mais de la multiplication de l'agent fongique et de sa capacité à produire les toxines. La multiplication peut intervenir soit lorsque l'agent est encore dans le milieu extérieur (ce qui augmente d'autant les risques d'inoculation), soit lorsque ce

champignon est déjà présent sur la plante, de sorte qu'il participe très activement à la détermination du niveau de contamination. Dans cette situation, les pratiques agricoles jouent sur la quantité de l'agent dans le milieu, sur les risques d'inoculation, sur le déplacement du champignon sur ou dans la plante, enfin sur sa multiplication sur les organes récoltés (encadré 2 pour l'exemple de la production de mycotoxines par les fusarioses dans le blé).

La voie « métabolique » (figure 3)

Les toxiques de la voie « métabolique » sont des éléments du métabolisme normal des végétaux (à ce titre, les oligo-éléments métalliques comme le cuivre ou le fer par exemple ont un statut mixte). Dès lors, il n'est plus question d'apport exogène, d'absorption passive ou de multiplication d'organismes vivants : ce sont les rapports entre le métabolisme général de la plante et le métabolisme particulier des organes récoltés qui déterminent le niveau de « contamination ». Dans ce cas, c'est l'ensemble des pratiques agricoles qui sont susceptibles d'avoir un rôle important. Le nitrate par exemple, qui constitue la principale source d'azote chez les végétaux cultivés, est réduit en nitrite puis en ammonium dans les feuilles ou les racines, et est pratique-

Encadré 2

Contamination des récoltes de blé par des fusarioses toxigènes

Les symptômes de fusariose sur les épis de blé sont provoqués par des champignons des genres *Microdochium* et *Fusarium*, seuls ces derniers étant susceptibles de produire des substances toxigènes, parmi lesquelles les plus importantes sont des trichothécènes des groupes A et B, les fumonisines (A et B) ainsi que la zéaralénone, produites en proportions variables selon les espèces de *Fusarium* [28]. *F. graminearum*, *F. roseum* et *F. culmorum* sont aussi susceptibles de se développer sur d'autres céréales comme le maïs ou le riz (où leur production de toxines, toutes choses égales par ailleurs, peut d'ailleurs être plus élevée [29]). Si les conditions de stockage jouent un rôle important sur l'accumulation des toxines dans les grains, rôle qui semble d'ailleurs différer entre les molécules [30], l'infection des épis au champ par les champignons reste une phase essentielle du processus. Cette infection, favorisée par une humidité élevée [31], est réalisée par des ascospores ou des conidies libérées par les résidus de culture infectés laissés sur la parcelle. Dès lors, la nature du précédent cultural (selon qu'il est hôte ou non-hôte des agents pathogènes), le type de travail du sol (selon le degré d'enfouissement des résidus qu'il permet), influencent le niveau d'attaque par la maladie [32, 33], divers selon les variétés cultivées (qui présentent des niveaux de résistance très différents [34, 35]) et selon les matières actives fongicides appliquées (dont l'efficacité contre le genre *Fusarium* varie également [36]).

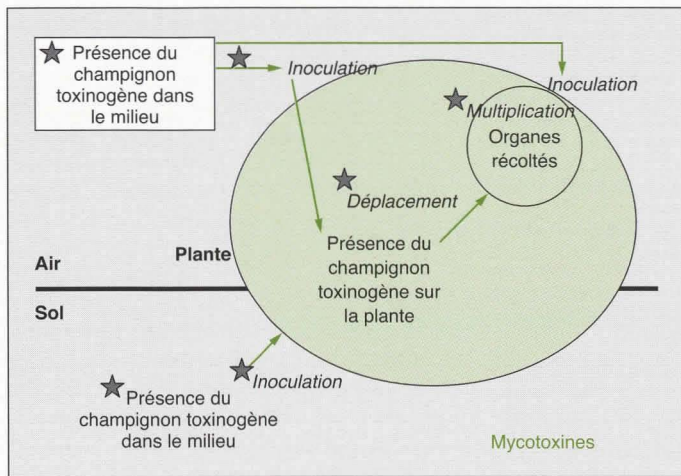


Figure 2. Description schématique de (la « voie de contamination proliférative ». Les principaux contaminants concernés sont inscrits en bas à droite de la figure. Les étoiles indiquent les étapes présentant une forte sensibilité aux techniques de production.

Figure 2. The "multiplicative contamination pathway". Major contaminants are listed on the lower right-hand corner; the stars indicate the more sensitive stages of the contamination pathway to cropping systems.

ment absent des organes de réserve. Sa concentration dépend du rapport entre les « entrées » de nitrate et les « sorties » par réduction, ces dernières étant fonction, entre autres, du métabolisme carboné de la plante. Une augmentation de ce dernier (rayonnement plus fort) peut donc entraîner une diminution de la teneur en nitrate, une augmentation de l'absorption d'azote (températures plus élevées) un accroissement de cette teneur [16] ; la teneur en nitrate est par ailleurs très corrélée à l'accumulation d'eau dans la plante ([17] sur laitue). De Tourdonnet [18] a illustré ces phénomènes dans le cas de la laitue en montrant le rôle que pouvait jouer la conduite de la culture sous abri, en interaction avec le climat, sur les variations de teneur en nitrate des salades récoltées.

La voie « génétique » (figure 4)

La voie « génétique » concerne la contamination par des gènes indésirables, en particulier des transgènes contaminant une parcelle cultivée avec une variété non transgénique. Une récolte peut être contaminée soit parce que les semences mises en terre étaient déjà contaminées (elles l'ont été l'année précédente, par transfert de gène par du pollen vers la plante-mère portant les semences, figure 4), soit parce que, dans la parcelle, étaient présentes des graines elles-mêmes contaminées, issues des années antérieures, ou apportées non intentionnellement sur la parcelle. Dans le premier cas, où le transfert a lieu *via* du pollen, les pratiques agricoles déterminent la présence de transgènes à proximité de la plante-mère (c'est dans ce cas la répartition des cultures dans l'espace qui est importante), mais également le fait que le transfert de gène peut avoir lieu ou pas (par exemple,

si dans une jachère les plantes susceptibles de libérer du pollen contaminant sont systématiquement éliminées avant leur floraison) [19]. Dans le second cas, où la contamination a lieu par les graines présentes dans le stock semencier de la parcelle, l'ensemble des techniques qui jouent sur le nombre de graines présentes, la levée de ces graines (par exemple, le type de travail du sol), et enfin leur date de mort (techniques de désherbage) vont influencer le taux de contamination [19].

Ces quatre grandes voies de contamination présentent des sensibilités différentes à des modifications de systèmes de culture (on ne peut dès lors prétendre classer *a priori* des systèmes de culture en termes de sécurité sanitaire des aliments sans préciser d'abord le ou les critères auxquels on s'intéresse). L'ensemble des échelles spatiales et pas de temps couramment utilisés par les agronomes pour analyser les pratiques agricoles [20] et leurs conséquences sont concernés : parcelles agricoles mais aussi leur agencement dans un espace ; technique culturale isolée mais aussi raisonnement de l'ensemble de ces techniques, et succession des cultures sur une même parcelle. Le tableau 2 indique ainsi les éléments du système de culture communément mis en cause dans ces différentes voies de contamination. Y figurent les aspects du système de culture ayant un effet direct : les conditions de croissance du peuplement végétal étant susceptibles d'influencer le niveau de contamination, de nombreuses techniques culturales peuvent jouer un rôle. La fertilisation minérale par exemple, qui ne joue généralement pas de rôle direct, a un effet indirect dans la mesure où elle détermine le niveau de croissance, en interaction avec de nombreux autres facteurs.

Tableau 2

Hypothèses sur la sensibilité directe des grandes voies de contamination à quelques éléments des systèmes de culture

	Techniques culturales				Itinéraire technique : ensemble des techniques jouant sur la croissance et le développement du peuplement végétal	Succession des cultures	Agencement des cultures dans l'espace
	Apport d'amendements organiques	Travail du sol	Génotype	Emploi de produits phytosanitaires			
Voie « passive »	+	+	+	0 ou + selon le contaminant	+	+	0
Voie « proliférative »	0	+	+	+	+	+	+
Voie « métabolique »	+	+	+	0	+	+	0
Voie « génétique »	0	+	+	+	+	+	+

0 : absence de sensibilité.

+: sensibilité certaine ou probable.

Hypotheses on the direct impact of cropping systems on the contamination pathways

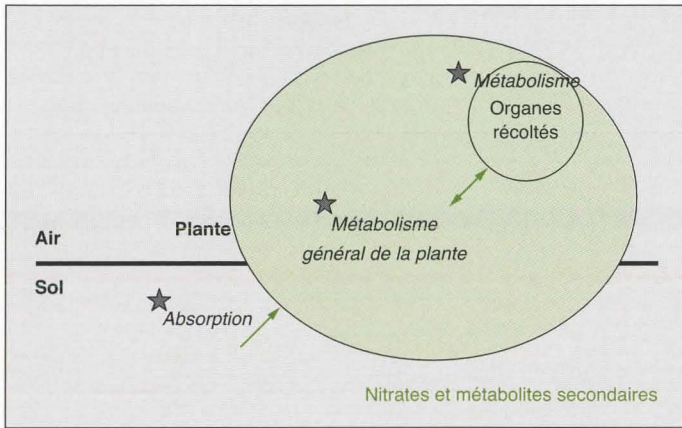


Figure 3. Description schématique de la « voie de contamination métabolique ». Les principaux contaminants concernés sont inscrits en bas à droite de la figure. Les étoiles indiquent les étapes présentant une forte sensibilité aux techniques de production ; l'absorption ne concerne pas les métabolites secondaires.

Figure 3. The "metabolic contamination pathway". Major contaminants are listed on the

lower right-hand corner; the stars indicate the more sensitive stages of the contamination pathway to cropping systems. Secondary metabolites are not affected by absorption.

« Bonnes » pratiques agricoles et sécurité sanitaire des aliments ?

Éliminer les toxiques de la phase de production ou identifier les étapes clés de la contamination qu'il faut maîtriser

On pourrait envisager de régler le problème en supprimant la présence des toxiques lors de la phase de production. La faisabilité de cette solution est très variable d'une catégorie de contaminant à l'autre, selon sa voie de contamination principale. Elle est impossible pour les toxiques constitutifs du végétal et les éléments traces naturellement présents dans les sols, est subor-

donnée à la modification d'autres activités que l'agriculture pour les éléments trace et autres polluants déposés par l'atmosphère ; elle serait dans la pratique impossible pour les champignons toxigènes. Elle concernerait donc essentiellement les agents pathogènes apportés par la voie « passive », les produits phytosanitaires, et les gènes « polluants ».

En outre, l'impératif de sécurité sanitaire n'est pas le seul objectif de la production végétale, et adopter une telle solution pourrait rendre difficile la réalisation d'autres objectifs. Inversement, les toxiques peuvent avoir d'autres effets négatifs que ceux sur la santé, sur l'environnement en particulier. À titre d'exemple, l'utilisation de certains produits phytosanitaires, difficilement contournable pour obtenir une régularité (et rentabilité) des récoltes (en dehors de l'agriculture biologique), entraîne une pollution de l'eau, voire de l'air. L'agriculture présente le moins d'inconvénients pour le recyclage de divers sous-pro-

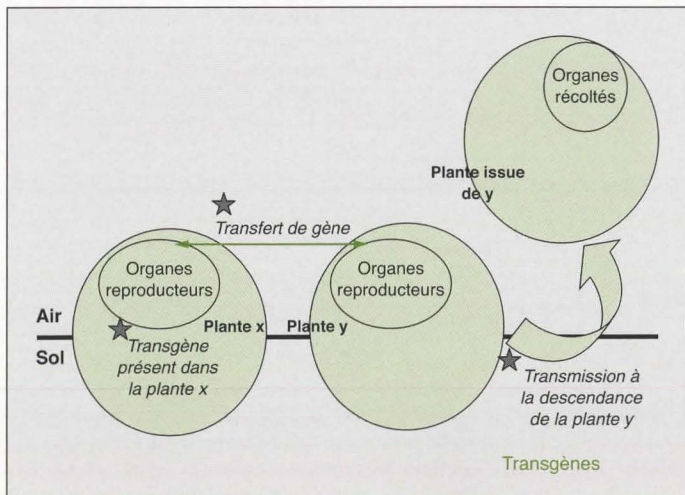


Figure 4. Description schématique de la « voie de contamination génétique ». Les principaux contaminants concernés sont inscrits en bas à droite de la figure. Les étoiles indiquent les étapes présentant une forte sensibilité aux techniques de production.

Figure 4. The "genetic contamination pathway". Major contaminants are listed on the lower right-hand corner; the stars indicate the more sensitive stages of the contamination pathway to cropping systems.

duits de l'activité humaine (déjections animales, effluents d'industries agro-alimentaires, déchets urbains, etc.), mais ce recyclage entraîne une contamination des sols, ainsi que d'autres nuisances environnementales. Enfin une contamination qui aujourd'hui n'apparaît pas comme un problème de santé publique pourrait être considérée comme telle ultérieurement. La suppression des contaminants dans le milieu, quand elle est possible, doit dès lors s'apprécier : (i) par une évaluation contradictoire des effets bénéfiques et des risques connus ou inconnus qu'elle fait encourir en termes de santé publique (et de ses autres effets négatifs, comme l'atteinte à l'environnement) ; (ii) par un examen simultané des autres moyens de limiter l'accumulation des toxiques dans les aliments en adaptant les pratiques agricoles quand ces toxiques sont présents dans le milieu.

La distinction des quatre voies de contamination représente une première base de travail permettant d'identifier les étapes clés sur lesquelles on est susceptible d'agir : accumulation et absorption pour la voie « passive », inoculation et multiplication pour la voie « proliférative », fonctionnement général de la plante pour la voie « métabolique », enfin déplacement et multiplication pour la voie « génétique ».

Pratiques agricoles et seuil de contamination

L'éviction totale des contaminants du champs cultivé n'étant ni toujours envisageable ni forcément souhaitable, il est nécessaire de définir, en se fondant sur les étapes clés de la contamination, des pratiques agricoles permettant d'éviter les intoxications. Édicter des normes qui encadreraient les pratiques agricoles postulerait que l'on soit capable de relier, par des relations quantitatives, les pratiques agricoles et les taux de contamination, de manière à ce que les taux mesurés sur les produits récoltés (fin de la phase de production) soient inférieurs à un taux de référence T pour chaque critère. Pour ce faire, des ensembles méthodologiques ont déjà été largement mobilisés pour transformer les systèmes de culture [20, 21].

Mais les situations de relations quantitatives entre technique agricole d'une part, et contamination ou concentration des toxiques d'autre part, sont l'exception. Le plus souvent, on n'a qu'une idée qualitative des sens de variation. Par exemple, on sait que l'application de produits phytosa-

nitaires va jouer dans le sens d'une augmentation des taux de résidus dans les produits récoltés par rapport à une absence d'emploi de ces produits, mais il n'y a pas d'abaque permettant de relier la quantité appliquée au taux final. En effet, le taux de contamination va dépendre non seulement de la quantité de matière active épandue mais également de la masse du produit végétal récoltée; pour une quantité de matière active appliquée par hectare, la fraction qui se dépose sur le végétal varie en fonction des conditions climatiques (pluie, vent...), de l'abondance des adventices susceptibles d'intercepter une partie du produit, de la surface interceptrice (donc du stade) de la culture. Enfin, les phénomènes d'absorption après dépôt et de transport dans la plante sont très variables selon les caractéristiques biochimiques des molécules utilisées, mais dépendent également des conditions de croissance de la culture; par ailleurs, les molécules sont dégradées au cours du temps, et le délai entre traitement et récolte joue de manière déterminante sur le taux de contamination – mais les conditions climatiques interviennent également sur la vitesse de dégradation.

On sait que la présence, dans une parcelle, de résidus d'une culture précédente, hôte d'une maladie cryptogamique toxigène, permet la contamination de la culture en place par inoculation (*encadré 2*), mais on n'a pas établi de relation quantitative entre la masse de résidus présents à la surface du sol et le niveau d'attaque par la maladie en cause.

Enfin, une même modification technique risque, selon les cas, d'accroître le taux de contamination ou de le diminuer, eu égard à la complexité des relations entre techniques culturales et fonctionnement du peuplement végétal au sein du champ cultivé. À titre d'exemple, l'augmentation de la fertilisation azotée en culture de blé va généralement augmenter la croissance du peuplement végétal, sa teneur en azote, son nombre d'épis. Compte tenu du mode de contamination des épis par la fusariose, l'augmentation de la fertilisation azotée, en accroissant la densité de peuplement, est susceptible de limiter l'atteinte des épis par les spores contaminantes, le feuillage plus dense constituant un obstacle physique à leur dispersion. Mais par ailleurs, l'augmentation de la teneur en azote des tissus peut être un facteur d'aggravation de maladies cryptogamiques (septoriose du blé [22]). En

l'absence d'études expérimentales plus précises, il est impossible de savoir quelle est la résultante de ces deux effets antagoniques pour toute une gamme de conditions de culture. De nombreux autres exemples témoignent tous de l'incomplétude des connaissances sur le fonctionnement du champ cultivé impliquant la cinétique des contaminants.

La situation est d'ailleurs souvent plus compliquée que dans les exemples précédents. En effet, les différentes techniques culturales ont souvent des conséquences sur les processus de contamination par plusieurs toxiques sur une même culture, et ces effets sont parfois antagoniques. L'exemple le plus classique concerne la contamination duale par les résidus de fongicides et par les mycotoxines: la diminution de l'emploi des fongicides peut favoriser le développement des champignons toxinogènes, comme en témoignaient autrefois les intoxications à l'ergot de seigle, par exemple.

Par ailleurs, raisonner sur le choix des techniques culturales afin de limiter les contaminations à un niveau situé en deçà d'une norme T suppose que cette norme soit définie; or elle n'existe pas pour tous les toxiques et, si elle existe, c'est à titre provisoire. Ainsi pour les éléments traces, des difficultés analytiques ou de prise en compte de l'effet de la spéciation sur l'absorption par l'organisme, ainsi que l'absence d'étude sur des effets à long terme (immunotoxicité, effets sur la reproduction et le développement), rendent délicate la mise au point de seuils fondés sur des critères toxicologiques [23].

Enfin les conditions de production ou de stockage peuvent être à l'origine d'une contamination ultérieure. Les différentes phases du cycle de vie du produit ne sont en effet pas indépendantes du point de vue de la contamination par les toxiques: il est alors discutable de fixer une norme sur le produit récolté. Ainsi, la production de mycotoxines pendant la phase de stockage dépend-elle non seulement des conditions de conservation, mais aussi du niveau de contamination par le champignon au moment de la récolte. Dès lors, la seule mesure d'un niveau de contamination par les mycotoxines pourrait se révéler insuffisante, et mériterait d'être complétée par une évaluation du taux de contamination par le champignon, lorsque les relations entre production de mycotoxines et attaque par le champignon ne semblent pas stables (cas des fusarioses [24, 25]).

Pour une approche pragmatique et évolutive

L'éviction des contaminants pendant la phase de production serait donc difficile, mais il n'en reste pas moins que certaines portions limitées du système sont plus faciles à maîtriser que d'autres. Si elles correspondent à des étapes clés de la contamination, on peut agir à leur niveau en attendant de disposer des connaissances qui permettront de maîtriser l'ensemble du système. C'est par exemple le cas pour la voie passive de contamination, en ce qui concerne les apports d'éléments traces dans le milieu par les pratiques agricoles, qui sont simplement fonction des volumes d'engrais et d'amendements apportés et de leurs concentrations en éléments traces. À défaut de connaissances suffisamment précises sur les effets des pratiques agricoles sur les étapes suivantes de la contamination (absorption, concentration), la limitation de la contamination passera d'abord par une limitation des apports dans le milieu (réglementation concernant l'apport de boues de stations d'épuration, par exemple); au fur et à mesure que des connaissances complémentaires permettront, on pourra envisager d'agir également sur les phases suivantes, en choisissant par exemple des variétés ou des espèces limitant l'absorption [26], ou en adoptant des pratiques limitant la biodisponibilité des éléments présents dans le milieu [27].

Un même raisonnement semble pouvoir être appliqué aux autres voies de contamination: (i) identification des étapes clés de la contamination pour lesquelles on sait déjà prévoir les effets des pratiques agricoles; (ii) définition d'un premier ensemble de pratiques agricoles permettant de limiter les risques; (iii) simultanément, poursuite des recherches sur les effets des pratiques sur les différentes étapes clés de la contamination; (iv) enrichissement progressif du référentiel de « bonnes pratiques vis-à-vis de la contamination ».

L'étape ultime consistera à considérer simultanément les effets des systèmes de culture sur plusieurs contaminants, ce qui amènera à résoudre des questions de hiérarchie et de compromis. Pour avancer dans ces différentes étapes, la mobilisation des outils méthodologiques des agronomes (expérimentation système de culture, modélisation fonctionnelle du champ cultivé, analyse des relations spatiales entre parcelles, conception multiobjectifs...) appliquée aux différentes voies de contamination et contaminants devrait s'avérer fructueuse.

Conclusion

Notre réflexion met en évidence que la phase de production est impliquée dans différents phénomènes de contamination des produits végétaux, mais que les manières de diminuer l'ampleur du phénomène vont varier fortement en raison de l'existence de plusieurs voies de contamination assez contrastées, dont la sensibilité aux pratiques agricoles est très variable. Dès lors, développer des recherches permettant de mieux identifier les relations entre modes de conduite des cultures et risques de toxicité est un impératif. Il sera nécessaire d'accumuler les expériences pour parvenir à rédiger des règles pérennes pour l'évaluation de l'innocuité des nouveaux aliments et celle des aliments courants, en prenant en compte les nouvelles données toxicologiques. D'une manière générale, la recherche agronomique en ce domaine devrait prendre trois directions complémentaires : (i) introduction de nouveaux critères d'évaluation des systèmes de culture innovants, permettant d'apprécier ces systèmes sur le plan de la sécurité sanitaire comme on les apprécie d'un point de vue économique ou environnemental ; (ii) production des connaissances nouvelles sur le fonctionnement du champ cultivé nécessaires pour faire évoluer les pratiques dans le sens d'une diminution du risque : facteurs de variation des transferts de contaminants inertes (xénobiotiques, éléments traces, agents pathogènes pour l'homme) du sol au peuplement végétal, des transferts intra-plante vers les produits récoltés et de leur accumulation, conditions d'expression des concentrations élevées des contaminants ayant un rôle physiologique de premier plan (nitrate principalement) ou des métabolites secondaires, conditions de développement des contaminants d'origine biologique (transgènes, mycotoxines) ; (iii) *in fine*, prédiction des teneurs en différents contaminants en fonction de la qualité des sols et des systèmes de culture employés ■

Références

1. Flandrin JL, Montanari M. *Histoire de l'alimentation*. Paris : Fayard, 1996.
2. Deschamps JP. Les enjeux de santé publique dans les pays en voie de développement. *Médecine/Sciences* 2000 ; 11 : 1211-7.

Summary

Cropping systems and food safety

T. Doré, M. Le Bail, P. Verger

A full knowledge of the influence of the different production stages on the level of contamination of foodstuffs is necessary to manage food safety and to satisfy consumers' demands. In the particular case of vegetal production, it is not possible to exclude a priori the influence of agricultural practices on the contamination levels. Contaminants can be classified as follows: trace elements, organic pollutants, pesticides residues, chemicals implied in the normal metabolism of plants, human-pathogen microorganisms, mycotoxins and substances from GMO products. Table 1 shows the possible contamination pathways of vegetal foodstuffs by different chemicals or pathogen microorganisms during their life cycle.

Scientific knowledge of crop physiology allows four contamination pathways to be distinguished through the production stage (Figures 1 to 4): (i) a "passive pathway", preferentially for trace elements, pesticide residues, human-pathogen microorganisms; (ii) a "multiplicative pathway", for mycotoxins pathogen agents for which the final amount depends on the proliferation rate; (iii) a "metabolic pathway", for which contamination depends on the plant metabolism (e.g. nitrate); (iv) a "genetic pathway", for which contamination occurs by gene transfer.

These four pathways are differently affected by agricultural practices (see Table 2). They are all characterised by different key-points regarding contamination (deposition, absorption, transport within the plant, etc.). The definition of good agricultural practices allowing to ensure contamination levels below the toxicological limits is restricted by three main problems: (i) the lack of data to establish quantitative relationships between agricultural practices, crop physiology and chemical accumulation; (ii) the difficulty to evaluate opposite effects of agricultural practices on several contaminants; (iii) the absence of maximum limits of contamination for certain contaminants.

Nevertheless, a pragmatic and progressive approach to contamination during crop production is possible using available knowledge to evaluate and improve cropping systems.

Cahiers Agricultures 2002 ; 11 : 177-85.

3. DGCCRF. *Laboratoires : bilan 1998*. Paris : ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. 1998 ; 143 p.
4. Setbon M. Les risques sanitaires. *Médecine/Sciences* 2000 ; 11 : 1203-6.
5. Morot-Gaudry JF. *Assimilation de l'azote chez les plantes. Aspects physiologique, biochimique et moléculaire*. « Mieux comprendre ». Paris : Inra, 1997 ; 420 p.
6. Splittstoesser WE, Tunya GO. Crop physiology of cassava. *Hort Rev* 1993 ; 13 : 105-29.
7. Wal JM, Pascal G. Nouveaux aliments, nouveaux risques ? Analyse et évaluation des risques liés à la consommation des nouveaux aliments. *Médecine et Nutrition* 1999 ; 35 : 165-84.
8. Walker EA, Castegnaro M, Scriban R. Résultats préliminaires sur l'étude des nitrosamines en malterie et en brasserie. *Bios* 1980 ; 11 : 66-9.
9. Juste C, Robert M. Les apports et les sources de contaminants en traces. *CR Acad Agric Fr* 2000 ; 86 : 13-24.
10. Baize D. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)*. « Un point sur... ». Paris : Inra, 1997 ; 408 p.
11. Benoit P, Barriuso E, Bergeaud V, Etiévant V. Binding capacities of different soil size fractions in the formation of herbicide-bound residues. *Agronomie* 2000 ; 20 : 505-12.
12. Schiavon M, Barriuso E, Lichtfouse E, Morel JL. Contamination des sols et des productions agricoles par les produits phytosanitaires et les micropolluants organiques. In : Thévenet G, Riou P, eds. *Qualité des sols et qualité des productions agricoles*. Paris : Gemas & Comifer, 1997 : 55-169.
13. Legeas M. Contamination par les pathogènes. In : Thévenet G, Riou P, eds. *Qualité des sols et qualité des productions agricoles*. Paris : Gemas & Comifer, 1997 : 171-80.
14. Snijders CHA. Fusarium head blight and mycotoxin contamination of wheat, a review. *Neth J Plant Pathol* 1990 ; 96 : 187-98.
15. McMullen M, Jones R, Gallenberg D. Scab of wheat and barley: a re-emerging disease of devastating impact. *Plant disease*, 1997 ; 81 : 1340-8.
16. Dapigny L. *Accumulation du nitrate chez la laitue (Lactuca sativa L.)*. Thèse de Doctorat de l'Ina PG, Paris, 1997 ; 170 p.
17. Dapigny L, de Tourdonnet S, Roger-Estrade J, Jeuffroy MH, Fleury A. Effect of nitrogen

nutrition on growth and nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.), under various conditions of radiation and temperature. *Agronomie* 2000 ; 20 : 843-55.

18. de Tourdonnet S. *Maîtrise de la qualité et de la pollution nitrique en production de laitues sous abri plastique : diagnostic et modélisation des effets des systèmes de culture*. Thèse de Doctorat de l'Ina PG, Paris, 1998 ; 192 p.

19. Colbach N, Meynard JM. *Modelling the influence of cropping system on gene flow for herbicide resistant rapeseed. Presentation of model structure*. X^e Colloque international sur la biologie des mauvaises herbes, Dijon, 1996 : 223-30.

20. Meynard JM, Habib R, Doré T. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *CR Acad Agric Fr* 2001 ; 87 : 223-36.

21. Papy F. Pour une théorie du ménage des champs : l'agronomie des territoires. *CR Acad Agric Fr* 2001 ; 87 : 139-49.

22. Leicht MH, Jenkins PD. Influence of nitrogen on the development of *Septoria* epidemics in winter wheat. *J Agric Sci Camb*, 1994 ; 124 : 361-8.

23. Boisset M. Contamination des milieux par les éléments en traces. Les conséquences pour la santé de l'animal et de l'homme. *CR Acad Agric Fr* 2000 ; 86 : 49-65.

24. Perkowski J, Chelkowski J, Blazczak P, Snijders CHA, Wakulinski W. A study of the correlations between the amount of deoxynivalenol in grain of wheat and triticale and percentage of *Fusarium* damaged kernels. *Mycotoxin Res* 1991 ; 7 : (suppl.) Part II, 102-14.

25. Liu Weizhong, Langseth W, Skjinner H, Elen ON, Sundheim L. Comparison of visual head blight ratings, seed infection levels and deoxynivalenol production for assessment of resistance in cereals inoculated with *Fusarium culmorum*. *Eur J Plant Path* 1997 ; 103 : 589-95.

26. Vasseur P, Morel JL. Contamination des milieux par les éléments en traces. Les conséquences sur la plante et les écosystèmes. *CR Acad Agric Fr* 2000 ; 86 : 39-48.

27. Mench MJ, Manceau A, Vangronsveld J, Clisjters H, Mocquot B. Capacity of soil amendments in lowering the phytoavailability of sludge-born zinc. *Agronomie* 2000 ; 20 : 383-97.

28. Bottalico A. *Fusarium* diseases of cereals: species complex and related mycotoxin profiles, in Europe. *J Plant Pathol* 1998 ; 80 : 85-103.

29. Badawey A, Barakat MIE. Influence of substrate (corn, wheat and rice) on zearalenone production. *Egyptian J Food Sci* 1992 ; 20 : 423-6.

30. Homdork S, Hehrmann H, Beck R. Influence of different storage conditions on the mycotoxin production and quality of *Fusarium* infected wheat grains. *J Phytopath* 2000 ; 148 : 7-15.

31. Lacey J, Bateman GL, Mirocha CJ. Effects of infection time and moisture on development of ear blight and deoxynivalenol production by *Fusarium* spp. in wheat. *Ann App Biol* 1999 ; 134 : 277-83.

32. Teich AH, Hamilton JR. Effect of cultural practices, soil phosphorus, potassium, and pH on the incidence of *Fusarium* head blight and deoxynivalenol levels in wheat. *App Envir Microb* 1985 ; 49 : 1429-31.

33. Krebs H, Dubois D, Kulling C, Forrer HR. Effets du travail du sol et du précédent cultural sur la contamination du grain de blé par les *Fusarium* et la mycotoxine déoxynivalénol. *Agrarforschung* 2000 ; 7 : 264-8.

34. Arseniuk E, Foremka E, Goral T, Chelkowski J. *Fusarium* head blight reactions and accumulation of deoxynivalenol (DON) and some of its derivatives in kernels of wheat, triticale and rye. *J Phytopath* 1999 ; 147 : 577-90.

35. Jenny E, Hecker A, Kessler P, Kulling C, Forrer HR. Getreidefusariosen: sortenresistenz und Toxingehalte. *Agrarforschung* 2000 ; 7 : 270-3.

36. Matthias A, Menck BH, Bleihoder H. Untersuchungen zur Wirksamkeit von strobilurin-haltigen fungiziden im Vergleich zu Azolen auf den Gehalt an deoxynivalenol (DON) in Weizenproben des Erntejahres 1999. Erste Erkenntnisse. *Gesunde Pflanzen* 2000 ; 52 : 26-32.

Résumé

Maîtriser la qualité sanitaire des aliments nécessite une appréhension correcte des effets des différentes étapes du cycle de vie des produits. Dans le cas de la production végétale, on ne peut exclure *a priori* une influence des pratiques agricoles pour de nombreux contaminants, que l'on peut classer sur la base de leur nature : éléments traces, micro-polluants organiques, résidus de produits phytosanitaires, constituants chimiques du métabolisme normal des végétaux, agents biologiques pathogènes pour l'homme, mycotoxines, transgènes. Les connaissances sur le fonctionnement du champ cultivé permettent de distinguer quatre voies principales de contamination, sur lesquelles les pratiques culturales ont une influence plus ou moins forte. Chaque voie se caractérise par des étapes clés différentes de la contamination (dépôt, absorption, transport, etc.). L'établissement de bonnes pratiques culturales permettant de garantir des niveaux de contamination des produits récoltés inférieurs à des valeurs de référence fondées sur des bases toxicologiques se heurte à trois obstacles principaux : (i) le manque de quantification des relations entre pratiques agricoles, fonctionnement du peuplement cultivé et accumulation des toxiques ; (ii) la difficulté à concilier des effets antagoniques des pratiques culturales sur plusieurs contaminants ; (iii) l'absence de valeurs seuil pour certains contaminants. Une approche pragmatique et évolutive des contaminations pendant la phase de production est possible, sur la base des connaissances et méthodes utilisées pour évaluer et améliorer les systèmes de culture.
