DESCRIPTION DU CURRICULUM

Nom du projet : « Je mange pour vivre ou je vis pour manger » (OpenEAT)

Référence du projet : 1-2024-1-RO01-KA220-VET-000249064

Curriculum destiné aux experts et spécialistes en agriculture, technologies alimentaires, sécurité alimentaire et nutrition.

Enseignants responsables des parties théoriques :

Partenaire coordinateur (ROMPAN) : Daniela Voica, Dana Avram

Partenaire 1 (UBARI) : Pasquale Filannino, Donato Gerin, Stefania Pollastro

Partenaire 2 (ANSES) : Petru Jitaru, Rachida Chekri, Chanthadary Inthavong, Julien Parinet

Partenaire 3 (ULST) : Ersilia Alexa, Delia Dumbrava, Camelia Moldovan, Corina Misca, Diana Raba, Mirela Popa

Partenaire 4 (FINS) : Aleksandra Torbica, Bojana Filipčev, Olivera Šimurina

Partenaire 6 (UKR) : Iryna Antonik, …

Professeurs responsables des parties pratiques :

Partenaire principal (ROMPAN) : Daniela Voica, Dana Avram

Partenaire 1 (UBARI) : Pasquale Filannino, Donato Gerin, Stefania Pollastro

Partenaire 2 (ANSES) : Petru Jitaru, Julien Parinet

Partenaire 3 (ULST) : Ersilia Alexa, Delia Dumbrava, Camelia Moldovan, Corina Misca, Diana Raba, Mirela Popa

Partenaire 4 (FINS) : Aleksandra Torbica, Bojana Filipčev, Olivera Šimurina

Partenaire 6 (UKR) : Iryna Antonik, …

Objectifs	Le curriculum établit les compétences cognitives et les aptitudes nécessaires aux experts et spécialistes concernant les mesures de réduction de la contamination des céréales, les méthodologies de détection des pesticides, des métaux lourds et des composés azotés toxiques, ainsi que leur impact sur la santé. Les compétences cognitives font référence à la capacité d'utiliser les concepts scientifiques issus des disciplines fondamentales telles que la chimie, la biologie et les technologies générales, dans le but de développer de nouvelles stratégies pour assurer la sécurité alimentaire dans le contexte du conflit ukrainien. Le curriculum présentera à la fois les aspects théoriques et pratiques relatifs aux mesures de réduction de la contamination des céréales, aux méthodologies de détection des pesticides, des métaux lourds et des composés azotés toxiques, ainsi qu'à leur impact sur la santé.
Compétences cognitives	Lors de la conception d'un programme d'études axé sur les mesures visant à réduire la contamination des céréales par les pesticides, les composés azotés et les métaux lourds, il est essentiel de développer des compétences cognitives qui améliorent la résolution de problèmes, la pensée critique et la prise de décision. Voici les principales compétences cognitives à inclure : **1. Esprit analytique** ● Identifier les sources de contamination des céréales et leur impact sur la santé ● Analyser les données sur les sols et les cultures pour détecter les tendances de contamination ● Évaluer l'efficacité de différentes stratégies de réduction de la contamination **2. Esprit critique** ● Évaluer les risques liés à la contamination par les pesticides et les métaux lourds ● Comparer différentes pratiques agricoles pour réduire la contamination ● Remettre en question et valider les résultats de la recherche sur le contrôle de la contamination **3. Résolution de problèmes** ● Développer des solutions innovantes pour minimiser la contamination ● Adapter les techniques agricoles afin de réduire les résidus chimiques ● Relever les défis de conformité réglementaire dans des scénarios réels **4. Prise de décision** ● Choisir des stratégies de lutte antiparasitaire appropriées avec un impact environnemental minimal ● Équilibrer productivité et durabilité en culture céréalière ● Interpréter les résultats des tests de laboratoire pour prendre des décisions éclairées en matière de contrôle de la contamination **5. Compétences en recherche et investigation scientifiques** ● Réaliser des expériences sur le terrain pour atténuer la contamination ● Analyser la littérature scientifique sur la réduction des pesticides et des métaux lourds ● Appliquer des méthodologies de recherche pour évaluer les niveaux de contamination **6. Pensée systémique** ● Comprendre les interactions entre le sol, l'eau, les cultures et les contaminants ● Reconnaître les effets à long terme de la contamination sur les écosystèmes et la santé ● Concevoir des systèmes agricoles durables qui minimisent les risques de contamination

Compétences professionnelles	L'élaboration d'un programme d'études visant à réduire la contamination des céréales requiert un ensemble de connaissances scientifiques, techniques et réglementaires. **1. Compétences en sciences agricoles et environnementales** ● Compréhension du comportement des pesticides dans les sols et les cultures ● Connaissance du cycle de l'azote et de l'impact des engrais sur les céréales ● Connaissance des sources de contamination par les métaux lourds (pollution industrielle, composition des sols, irrigation) ● Techniques de surveillance des sols et des cultures **2. Sécurité alimentaire et contrôle de la qualité** ● Principes de l'analyse des risques et de la maîtrise des points critiques (HACCP) ● Évaluation des risques liés aux résidus de pesticides et aux métaux lourds ● Méthodes d'analyse en laboratoire des contaminants (par exemple, chromatographie, spectroscopie) ● Réglementations internationales en matière de sécurité alimentaire (UE, FAO, Codex Alimentarius) **3. Agriculture durable et agriculture de précision** ● Bonnes pratiques d'application des pesticides et stratégies de réduction ● Techniques de lutte intégrée contre les ravageurs (LIR) ● Pratiques agricoles biologiques et régénératrices ● Outils d'agriculture de précision (drones, capteurs, IA pour la surveillance de la santé des sols) **4. Connaissances réglementaires et de conformité** ● Cadres juridiques relatifs à l'utilisation des pesticides et aux limites de résidus ● Limites maximales de résidus (LMR) et normes réglementaires ● Exigences de certification pour les céréales biologiques et durables **5. Analyse des données et utilisation des technologies** ● Analyse statistique des niveaux de contamination ● Utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) pour la cartographie de la contamination des sols et des eaux ● Applications de l'IA et de l'IoT pour la surveillance de la contamination
Unités de compétence	**1. Sources de contamination et évaluation des risques** <u>Compétences :</u> ● Identifier les principales sources de contamination des céréales (pesticides, engrais, métaux lourds) ● Évaluer les facteurs environnementaux et agricoles contribuant à la contamination ● Analyser les voies de contamination (sol, eau, air) et leur impact sur la sécurité alimentaire <u>Thèmes clés :</u> ● Formation et persistance des résidus de pesticides ● Composés azotés : surutilisation, ruissellement et lessivage ● Accumulation de métaux lourds d'origine industrielle et naturelle ● Méthodologies d'évaluation des risques

	2. Pratiques agricoles durables et intégrées Compétences : ● Appliquer la lutte intégrée contre les ravageurs (LIR) pour réduire la dépendance aux pesticides ● Mettre en œuvre des techniques de fertilisation durables pour minimiser la contamination par les composés azotés ● Utiliser des méthodes de restauration et de conservation des sols pour réduire l'absorption de métaux lourds Thèmes clés : ● Lutte biologique contre les ravageurs et rotation des cultures ● Agriculture de précision pour une fertilisation contrôlée ● Gestion du pH du sol et Techniques de bioremédiation ● Alternatives à l'agriculture biologique **3. Surveillance et détection des contaminants** Compétences : ● Réaliser des analyses sur le terrain et en laboratoire pour détecter les résidus de pesticides, les nitrates et les métaux lourds ● Utiliser des techniques de détection modernes (chromatographie, spectrométrie, biocapteurs) ● Interpréter les niveaux de contamination et proposer des mesures correctives Sujets clés : ● Méthodes d'analyse en laboratoire (GC-MS, HPLC, ICP-MS) ● Limites réglementaires pour les contaminants (normes UE, Codex, FAO) ● Techniques de tests rapides sur site **4. Conformité réglementaire et normes de sécurité alimentaire** Compétences : ● Appliquer les limites maximales de résidus (LMR) et les réglementations en matière de sécurité alimentaire ● Garantir le respect des normes nationales et internationales ● Mettre en œuvre l'analyse des risques et points critiques pour leur maîtrise (HACCP) pour prévenir la contamination Sujets clés : ● Réglementation européenne sur les pesticides, Codex Alimentarius de la FAO, directives de l'OMS ● Bonnes pratiques agricoles (BPA) ● Principes HACCP pour la production et le stockage des céréales **5. Solutions technologiques et numériques pour la réduction de la contamination** Compétences : ● Utiliser les technologies d'agriculture de précision (drones, capteurs, IA) pour le contrôle de la contamination ● Appliquer la cartographie SIG pour surveiller les zones contaminées ● Mettre en œuvre des systèmes intelligents d'irrigation et de fertilisation Thèmes clés : ● Applications de l'IA et de l'IoT en agriculture durable ● Cartographie de la contamination basée sur SIG

	● Systèmes automatisés d'application de pesticides et d'engrais **6. Chaîne d'approvisionnement durable et sensibilisation des consommateurs** <u>Compétences :</u> ● Gérer la manutention post-récolte pour prévenir la contamination ● Assurer un approvisionnement durable et la traçabilité de la production céréalière ● Sensibiliser les parties prenantes aux risques de contamination et aux stratégies d'atténuation <u>Thèmes clés :</u> ● Prévention de la contamination lors du stockage et du transport ● Technologies de la blockchain et de la traçabilité ● Éducation des consommateurs à la sécurité alimentaire
Éléments d'innovation	Les éléments d'innovation sont dus à la complémentarité des compétences qui sont destinées à être mises en œuvre auprès des groupes cibles et qui portent sur des éléments d'agronomie, de protection des céréales, de détection des contaminants, d'outils analytiques et d'implication sanitaire afin de gérer la contamination des céréales et d'assurer la sécurité alimentaire dans le contexte du conflit ukrainien.
Impact	La mise en œuvre d'un programme bien structuré sur ce sujet peut avoir des effets positifs significatifs dans de nombreux domaines, allant de l'agriculture et de la santé publique à la durabilité environnementale et aux avantages économiques. Voici les principaux domaines d'impact : **1. Impact agricole et environnemental** ● Réduction de la contamination des sols et de l'eau ● Amélioration de la qualité et de la sécurité des cultures ● Résilience et durabilité climatiques **2. Impact sur la santé publique et la sécurité alimentaire** ● Approvisionnement alimentaire plus sûr ● Réduction des risques sanitaires ● Confiance accrue des consommateurs **3. Impact économique et industriel** ● Augmentation de la valeur marchande des céréales sans contaminants ● Réduction des coûts pour les agriculteurs ● L'utilisation efficace des pesticides et des engrais réduit le coût des intrants ● La prévention de la contamination évite les pertes financières potentielles liées aux exportations rejetées ● Création d'emplois et avancées technologiques ● Augmentation de la demande de professionnels qualifiés en agriculture de précision, sécurité alimentaire et surveillance environnementale ● Encouragement des innovations agro technologiques telles que la détection de la contamination par l'IA **4. Impact sur l'éducation et la recherche** Renforcement des capacités des futurs experts agricoles ● Les agriculteurs, les agronomes et les décideurs politiques acquièrent des connaissances approfondies sur Réduction de la contamination ● La formation à la prise de décision basée sur les données améliore l'efficacité agricole **Encouragement de l'innovation scientifique**

	● La recherche sur la biorestauration, les nanotechnologies et les luttes alternatives contre les nuisibles favorise la durabilité ● Collaboration accrue entre les universités, les instituts de recherche et les leaders de l'industrie **Échange mondial de connaissances** ● Les partenariats internationaux facilitent l'apprentissage des meilleures pratiques dans différentes régions ● L'intégration de plateformes d'apprentissage en ligne permet le partage des connaissances au-delà des communautés locales **5. Impact politique et réglementaire** Renforcement du respect des réglementations en matière de sécurité alimentaire ● Les agriculteurs et les producteurs sont mieux équipés pour respecter les normes nationales et internationales ● Les agences gouvernementales améliorent le suivi et l'application des politiques de contrôle de la contamination Prise de décision éclairée pour les décideurs politiques ● Les données scientifiques du programme soutiennent l'élaboration de politiques fondées sur des données probantes ● Amélioration des stratégies de réduction de la pollution agricole et de la surutilisation de produits chimiques Autonomisation des communautés locales ● Les initiatives de science citoyenne encouragent la participation du public à la surveillance de la sécurité alimentaire ● Une sensibilisation accrue conduit à un plaidoyer en faveur de réglementations environnementales et de sécurité alimentaire plus strictes

Horaires des activités

	Heures totales	Théorique	Pratique	Étude individuelle
	82	**48**	**24**	**10**

Matières du programme

Partie théorique	Nombre d'heures	Obs
Chapitre 1. Introduction aux risques de contamination des céréales dans l'agriculture en situation de conflit ● *Comprendre l'impact des activités militaires sur la contamination des sols et des cultures* ● *Identifier les principaux contaminants : pesticides, composés azotés et métaux lourds* ● *Analyser les voies de contamination des céréales et des systèmes alimentaires* ● *Aperçu des risques de contamination agricole* ● *Sources de contamination par les métaux lourds (plomb, arsenic, cadmium)* ● *Effets des pesticides et des engrais azotés excessifs sur les sols et l'eau*	2 (LTT 1-3)	Chaque partie théorique comprend 8 heures sur 2 jours. Au total, 16 heures par semaine.
Chapitre 2. Termes et définitions ● *Termes généraux relatifs à la contamination* ● *Termes relatifs à la contamination par les métaux lourds* ● *Termes relatifs à la contamination par les composés azotés* ● *Termes relatifs à la contamination par les pesticides* ● *Termes relatifs à la contamination agricole spécifique aux conflits* ● *Termes réglementaires internationaux et européens*	2 (LTT 1-3)	
Chapitre 3. Contexte international du conflit ukrainien et législation nationale et européenne ● *Limites et seuils réglementaires (UE, FAO, Codex Alimentarius)*	2 (LTT 1-3)	
Chapitre 4. Mesures nécessaires pour réduire la contamination des céréales ● *Mesure visant à réduire la teneur en pesticides des céréales et des produits céréaliers* ● *Mesure visant à réduire la contamination par les métaux lourds des céréales et des produits céréaliers* ● *Mesure visant à réduire les composés azotés des céréales et des produits céréaliers*	8 (LTT1)	
Chapitre 5. Méthodes d'analyse pour le contrôle des contaminants ● *Méthodes d'analyse pour la détection de la teneur en pesticides dans les céréales et les produits céréaliers* ● *Méthodes d'analyse pour la détection de la contamination par les métaux lourds dans les céréales et les produits céréaliers* ● *Méthodes d'analyse pour la détection des composés azotés dans les céréales et les produits céréaliers*	8 (LTT2)	
Chapitre 6. Risque sanitaire lié à la contamination des céréales et des produits céréaliers	8 (LTT3)	

● *Risque sanitaire lié à la contamination des céréales et des produits céréaliers par des pesticides* ● *Risque sanitaire lié à la contamination des céréales et des produits céréaliers par des métaux lourds* ● *Risque sanitaire lié à la contamination des céréales et des produits céréaliers par des composés azotés*		
Évaluation	2 (LTT1-3)	
Partie pratique Les activités pratiques seront réalisées dans les laboratoires d'enseignement des universités partenaires, qui disposent des équipements nécessaires.	Nombre d'heures	Obs
i) Échanger les meilleures pratiques en matière de gestion des céréales et des produits connexes susceptibles d'être contaminés importés d'Ukraine.	8 LTT1	Chaque partie pratique comprend 8 heures x 1 jour (LTT1-3)
ii) Échanger les meilleures pratiques en matière de détection des contaminants dans les céréales et les produits céréaliers.	8 LTT2	
iii) Échanger les meilleures pratiques concernant les risques pour la santé et la sécurité alimentaire liés à la consommation de produits céréaliers contaminés par des pesticides, des métaux lourds et des composés azotés.	8 LTT3	
Méthodes d'évaluation : Les méthodes d'évaluation reposent sur des questions objectives, semi-objectives et subjectives. Les questions objectives font référence à l'évaluation basée sur les principes duel, du binôme ou du choix multiple de solutions proposées aux apprenants. Les questions semi-objectives peuvent être à réponse courte, complémentaire ou structurée, dans lesquelles l'apprenant intervient avec des solutions exprimées de manière partielle. Les questions subjectives font référence à la dissertation libre ou structurée, dans laquelle l'apprenant exprime librement ses solutions au problème posé ou en s'appuyant sur un schéma imposé. La résolution de problèmes sur le sujet enseigné est également incluse dans la catégorie des questions subjectives.		
Évaluation pour la certification des compétences : elle sera réalisée au moyen d'outils et de preuves élaborés conformément aux dispositions relatives aux compétences cognitives et professionnelles, en tenant compte des critères de performance et de leurs conditions d'applicabilité. Certains outils de preuves et d'évaluation pourront prendre en compte l'évaluation intégrée de plusieurs compétences ou de plusieurs critères de performance d'une même compétence ou de compétences différentes. L'évaluation met en évidence le degré de développement des compétences clés, des compétences techniques générales et des compétences techniques spécialisées.		
Liste des supports pédagogiques et de recherche : Les parties théoriques et pratiques seront illustrées par des textes, des images et des vidéos, et la méthode pédagogique finale tiendra compte du niveau du public cible.		

PROGRAMME ÉTENDU

Chapitre 1. Introduction

1.1. Comprendre l'impact des activités militaires sur la contamination des sols et des cultures

Les activités militaires peuvent introduire un large éventail de contaminants dans l'environnement, affectant les sols et, par conséquent, les cultures qui y poussent. Ces contaminants peuvent être classés comme suit :

Métaux lourds : Les munitions, les véhicules militaires, les drones et autres équipements peuvent libérer des métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le chrome, le lithium et l'uranium appauvri dans le sol. Ces métaux peuvent s'accumuler dans les plantes, présentant des risques pour la santé des consommateurs.

Composés explosifs : La détonation d'explosifs libère divers composés chimiques, notamment des composés nitro-aromatiques (par exemple, TNT, RDX) et des perchlorates, dans l'environnement. Ces composés peuvent être toxiques pour les plantes et les humains, et leur persistance dans le sol peut entraîner une contamination à long terme.

Propulseurs et carburants : Les déversements et fuites provenant de véhicules militaires et d'installations de stockage peuvent contaminer le sol avec des propulseurs (par exemple, le perchlorate d'ammonium) et des carburants (par exemple, les hydrocarbures). Ces substances peuvent nuire à la croissance et au développement des plantes, et certaines peuvent avoir des propriétés cancérigènes.

Armes chimiques et biologiques : Bien que moins fréquente, l'utilisation potentielle d'armes chimiques ou biologiques représente une grave menace de contamination généralisée et durable. Ces agents peuvent avoir des effets dévastateurs sur la santé humaine et l'environnement.

Matières radioactives : L'utilisation de munitions à l'uranium appauvri suscite des inquiétudes quant à la contamination radioactive. Si la radiotoxicité de l'uranium appauvri est débattue, sa toxicité chimique en tant que métal lourd est bien établie.

Munitions non explosées (UXO) : Les UXO, notamment les mines terrestres et les bombes non explosées, présentent non seulement un danger physique direct, mais peuvent également, au fil du temps, infiltrer des contaminants dans le sol environnant par corrosion.

L'impact de ces contaminants sur les sols et les cultures est multiforme :

Dégradation des sols : La contamination peut altérer les propriétés du sol, affectant sa fertilité, sa structure et sa capacité de rétention d'eau, et entraver ainsi la croissance des plantes.

Absorption et accumulation par les plantes : Les plantes peuvent absorber les contaminants du sol par leurs racines et les transférer vers différentes parties, y compris les parties comestibles comme les céréales. Le niveau d'accumulation dépend de divers facteurs, notamment le type de contaminant, sa concentration dans le sol, l'espèce végétale et les conditions environnementales.

Contamination de la chaîne alimentaire : Les cultures contaminées peuvent introduire ces substances nocives dans la chaîne alimentaire, affectant la santé humaine et animale. Une exposition à long terme à de faibles concentrations de contaminants peut entraîner des problèmes de santé chroniques.

Considérations importantes

La gravité de la contamination des sols et des cultures dépend du type et de l'intensité des activités militaires, du type de sol et du climat.

Les effets à long terme de la contamination des sols causée par les activités militaires peuvent être difficiles à évaluer et ne pas être pleinement compris avant de nombreuses années.

Il est essentiel de lutter contre la contamination des sols et des cultures causées par les activités militaires pour protéger la santé humaine et l'environnement.

1.2. Identifier les principaux contaminants : pesticides, composés azotés et métaux lourds.

Les céréales, aliment de base d'importance mondiale, sont vulnérables à diverses sources de contamination, ce qui présente des risques importants pour la santé humaine. Les pesticides, les composés azotés et les métaux lourds sont des contaminants majeurs particulièrement préoccupants en raison de leur utilisation généralisée, de leur persistance dans l'environnement et de leur potentiel d'effets néfastes sur la santé.

1.2.1. Pesticides

Ces agents chimiques sont utilisés pour lutter contre les ravageurs qui endommagent les cultures ou sont vecteurs de maladies. Bien qu'essentiels à la sécurité alimentaire, les résidus de pesticides dans les céréales représentent une menace importante pour la santé humaine.

Les principales classes de pesticides comprennent :

Organophosphorés – Agit sur le système nerveux en inhibant l'acétylcholinestérase (par exemple, chlorpyrifos, malathion, diazinon).

Carbamates – Similaires aux organophosphorés, mais avec une inhibition enzymatique réversible (par exemple, carbaryl, aldicarbe).

Organochlorés – Persistants dans l'environnement, nombre d'entre eux sont désormais interdits (p. ex., DDT, lindane).

Pyréthroïdes – Analogues synthétiques des pyréthrines naturelles, utilisés pour lutter contre les insectes (p. ex., perméthrine, cyperméthrine).

Néonicotinoïdes – Agit sur le système nerveux des insectes, mais leur impact sur les abeilles est controversé (p. ex., imidaclopride, thiaméthoxame).

Triazines – Herbicides courants inhibant la photosynthèse (p. ex., atrazine, simazine).

Sulfonylurées – Herbicides perturbant la synthèse des acides aminés des plantes (p. ex., metsulfuron-méthyl).

Phénoxy-herbicides – Utilisés pour lutter contre les mauvaises herbes à feuilles larges (p. ex., 2,4-D).

Dicarboximides – Fongicides inhibant la croissance fongique (p. ex., iprodione).

Strobilurines – Fongicides modernes qui perturbent la respiration mitochondriale (par exemple, l'azoxystrobine).
Chaque classe a des utilisations, des profils de toxicité et des impacts environnementaux spécifiques.

Impacts sur la santé

Les principaux impacts de l'exposition aux pesticides sur la santé humaine dépendent du type de pesticide, de la dose et de la durée d'exposition. Ils comprennent :

Effets chroniques (exposition à long terme)
1. Neurotoxicité – Risque accru de maladies neurodégénératives comme la maladie de Parkinson et de déclin cognitif.
2. Cancérogénicité – Certains pesticides (par exemple, les organochlorés et le glyphosate) sont associés au cancer, notamment à la leucémie et au lymphome non hodgkinien.
3. Perturbation endocrinienne – Interférence avec le système hormonal, affectant la santé reproductive, la fonction thyroïdienne et le développement fœtal.
4. Effets sur la reproduction et le développement – Diminution de la fertilité, anomalies congénitales et troubles du développement chez l'enfant.
5. Suppression du système immunitaire – Sensibilité accrue aux infections et aux maladies auto-immunes.
6. Lésions hépatiques et rénales – Une exposition chronique peut entraîner un dysfonctionnement organique dû à la bioaccumulation de composés toxiques.

Populations vulnérables
• Enfants et femmes enceintes – Plus sensibles en raison du développement de leurs organes.
• Travailleurs agricoles et applicateurs de pesticides – Risque d'exposition plus élevé par contact professionnel.
Les limites réglementaires et les mesures de sécurité visent à minimiser ces risques, mais l'exposition doit être soigneusement contrôlée.
● Cadres réglementaires : De nombreux pays ont mis en place des cadres réglementaires régissant l'application des pesticides et fixant des limites maximales de résidus (LMR) dans les céréales afin de réduire l'exposition des consommateurs (FAO/OMS, 2022).

1.2.2. Composés azotés
Les composés azotés, notamment les nitrates et les nitrites, sont des substances naturelles qui peuvent également pénétrer dans la chaîne alimentaire par le biais des pratiques agricoles, notamment l'application d'engrais azotés.
● Sources de contamination : L'utilisation excessive d'engrais azotés peut entraîner le lessivage des nitrates dans les eaux souterraines et de surface, contaminant ainsi l'eau d'irrigation et les cultures céréalières.
● Conséquences pour la santé : Des concentrations élevées de nitrates dans les céréales présentent des risques pour la santé, en particulier pour les nourrissons, car les nitrates peuvent être convertis en nitrites, entraînant une méthémoglobinémie, une affection altérant le transport de l'oxygène. De plus,

les nitrites peuvent réagir avec les amines gastriques pour former des nitrosamines cancérigènes (OMS, 2011).

● Mesures réglementaires : L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a établi des lignes directrices pour les concentrations de nitrates dans l'eau potable, et des réglementations similaires s'appliquent souvent aux produits alimentaires, y compris les céréales.

1.2.3. Éléments traces toxiques (ou "métaux lourds")

L'expression « métaux lourds » désigne les éléments métalliques dont la densité est relativement élevée par rapport à celle de l'eau. On suppose que cette lourdeur est associée à la toxicité.

Les métaux lourds sont également considérés comme des éléments traces (potentiellement toxiques), car ils sont présents à des concentrations traces, de l'ordre de quelques ppb à moins de 10 ppm dans la plupart des matrices environnementales. Auparavant, les scientifiques utilisaient le terme « métaux lourds » pour désigner les éléments traces. En réalité, tous les métaux ne sont pas essentiellement lourds (par exemple, Al, Ni) et certains éléments ne sont pas des métaux (par exemple, As, Se). C'est pourquoi les chercheurs préfèrent aujourd'hui le terme « éléments traces (métalliques) » ou, plus simplement, « éléments traces ».

Les métaux peuvent être classés comme essentiels et non essentiels, selon qu'ils jouent un rôle dans les processus biochimiques et physiologiques (Goyer et al., 2004). Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les éléments essentiels sont I, Zn, Se, Fe, Cu, Cr et Mo. D'autres oligo-éléments, tels que Mn, Co, As, Ni et V, peuvent avoir des effets bénéfiques ou être essentiels (Amiard et al., 2011). En effet, Cu et Fe sont incorporés dans plusieurs métalloenzymes impliquées dans la formation de l'hémoglobine et le métabolisme des glucides (Henriques et al., 2017), tandis que Zn joue un rôle important dans la division et la croissance cellulaires, la cicatrisation des plaies et la dégradation des glucides (Roohani et al., 2013). Les oligo-éléments non essentiels, tels que Hg, Pb ou Cd, ne jouent aucun rôle physiologique et sont toxiques à très faibles concentrations (Goyer et al., 2004).

Les oligo-éléments toxiques sont des éléments naturels généralement caractérisés par une masse atomique et une densité élevée, et présentent des effets toxiques sur les systèmes biologiques. Ces contaminants peuvent pénétrer dans la chaîne alimentaire par diverses voies, notamment les rejets industriels, les opérations minières et l'utilisation d'eau d'irrigation contaminée.

● **Elements toxiques représentatifs :** L'arsenic, le cadmium, le plomb et le mercure (le plus souvent accidentellement) comptent parmi les oligo-éléments toxiques les plus préoccupants dans les céréales. Ils peuvent être incorporés par les plantes céréalières à partir de sols et de sources d'eau contaminés.

● **Normes réglementaires :** Les organisations internationales (Union européenne, etc.) ainsi que les autorités nationales ont établi des normes et des lignes directrices concernant les concentrations d'oligo-éléments toxiques dans les céréales afin de minimiser l'exposition humaine.

1.3. Sources de contamination

1.3.1. Source de contamination par les pesticides

• Agriculture

L'agriculture est le principal secteur économique où les pesticides chlorés ont été utilisés, dont les effets se font encore sentir aujourd'hui. L'impact des pesticides utilisés en agriculture sur l'eau se manifeste par une pollution diffuse, actuellement mesurée dans les eaux souterraines et de surface.

Les émissions de polluants organiques persistants (POP) utilisés dans le secteur agricole dans l'atmosphère proviennent de sources fixes, telles que l'application de pesticides au sol et par brûlage, ou de sources mobiles principalement liées aux véhicules routiers (tracteurs et autres moyens de transport).

• Industrie

Les sources d'émissions du secteur industriel sont principalement ponctuelles. Cependant, il existe également des sources diffuses générées par le stockage de déchets solides et liquides issus de la production de pesticides. Les stocks existants (y compris les déchets) de POP sont corrélés aux quantités de POP qui ne sont plus utilisées et qui pourraient être éliminées.

1.3.2. Source de contamination par les composés azotés

La quantité de nitrates présente dans la plante à un instant T résulte de l'équilibre entre la quantité absorbée et la quantité utilisée lors de la protéinogènes. Tout facteur susceptible d'intervenir dans la chaîne métabolique assurant la transformation de l'azote nitrique en azote aminé et en azote protéique peut influencer la quantité de nitrates libres dans la plante.

Les sources de contamination des produits horticoles par les nitrates, les nitrites et l'ammonium sont :

• **sources naturelles :** nitrates provenant du sol, des eaux de surface et des eaux souterraines, résultant de la décomposition naturelle de l'azote organique par les micro-organismes et de sa transformation en protéines chez les plantes et les animaux. La présence naturelle de nitrates et de nitrites dans l'environnement est la conséquence du cycle de l'azote.

• **sources anthropiques :** utilisation d'engrais de synthèse pour la fertilisation des cultures horticoles, de l'agriculture et épandage des déchets issus de ces élevages sur les sols cultivés.
Une fertilisation excessive, avec des doses supérieures aux besoins en azote de la plante pendant la période de consommation maximale, entraîne une augmentation de la teneur en nitrates. L'administration d'engrais azotés, sous forme d'engrais foliaire, entraîne une augmentation de la teneur en nitrates, mais peu après l'application, la teneur en nitrates diminue jusqu'à atteindre la valeur de prétraitement. La teneur en nitrates des plantes peut être réduite de 20 à 25 % par pulvérisation d'eau avant la récolte.
Des concentrations élevées de nitrates sont observées dans les cultures cultivées sur des sols riches en azote et en humus, même en l'absence de fertilisation azotée. Le problème de la pollution par les nutriments commence au niveau des ménages, notamment par la gestion et l'utilisation inappropriée

du fumier en agriculture. L'agriculture biologique favorise l'utilisation du compost, un engrais respectueux de l'environnement, moins cher et facilement accessible.
Le potentiel génétique de la plante entraîne une accumulation de nitrates. Les espèces végétales caractérisées par la teneur en nitrates la plus élevée sont les légumes dont l'organe consommé est la feuille. Les conditions climatiques (température, précipitations, intensité lumineuse) déterminent la concentration de nitrates dans les plantes, en fonction des conditions dans lesquelles se déroule la réaction de réduction. Parmi celles-ci, le régime d'éclairage joue un rôle essentiel, car il intervient comme source d'énergie dans le processus de réduction des nitrates dans la plante (nitrate – nitrite – ammonium – acide aminé).

1.3.3. Sources de contamination par les métaux lourds (plomb, arsenic, cadmium, antimoine, chrome, nickel, zinc, mercure, aluminium)

Les résidus d'éléments lourds sont les résidus de guerre les plus persistants dans les zones touchées, contaminant l'air, le sol et l'eau. Leur durée de résidence dans l'environnement dépend de leurs propriétés redox. Les sources de contamination par les métaux sont les fumées et particules de tir, les fragments de balles, les amorces, les détonateurs, le matériel militaire, les armes à feu, les munitions, l'artillerie et les grenades, ainsi que les drones.
La contamination des cultures par des oligo-éléments toxiques provient principalement des sources suivantes :
(i) Contamination des sols : Les métaux lourds comme le plomb (Pb), l'arsenic (As) et le cadmium (Cd) s'accumulent dans les sols agricoles en raison des émissions industrielles, des activités minières et des sources géologiques naturelles.
(ii) Eau d'irrigation : L'eau contaminée provenant des rejets industriels, de l'irrigation par eaux usées ou des eaux souterraines naturellement riches en métaux peut introduire des métaux lourds dans le sol et les végétaux. (iii) Dépôt atmosphérique : Les polluants atmosphériques provenant des activités industrielles, des émissions des véhicules, de la combustion de combustibles fossiles et, exceptionnellement, des explosions (de guerre) peuvent se déposer sur les cultures et les sols, augmentant ainsi les concentrations de métaux.
(iv) Engrais et pesticides : Les engrais phosphatés et certains pesticides contiennent des traces de métaux lourds, contribuant à leur accumulation à long terme dans les sols.
(v) Application des déchets et des boues : L'utilisation de boues d'épuration, de compost ou de déchets organiques comme amendements du sol peut introduire des quantités importantes de métaux lourds dans les champs agricoles.
Une fois absorbés par les plantes, ces métaux peuvent s'accumuler dans les parties comestibles, présentant des risques pour la santé humaine.

1.4. Effets des pesticides et des engrais azotés excessifs sur les sols et l'eau

L'application excessive de pesticides et d'engrais azotés dans l'agriculture moderne, tout en contribuant à l'augmentation des rendements, représente une menace importante pour la qualité des sols et de l'eau, avec des conséquences sur la santé des écosystèmes et des préjudices potentiels pour le bien-être humain. Les céréales, source alimentaire dominante à l'échelle mondiale, sont particulièrement vulnérables à la contamination par ces intrants agrochimiques.

1.4.1. Pesticides

L'utilisation de pesticides pour la lutte antiparasitaire peut entraîner diverses conséquences écologiques imprévues sur les sols et les ressources en eau.

● Effets édaphiques :

Perturbation biotique : L'application de pesticides peut avoir un impact négatif sur les organismes non ciblés du sol, notamment les insectes utiles, les vers de terre et les communautés microbiennes, entraînant une diminution de la biodiversité et une perturbation de processus essentiels tels que le cycle des nutriments et la décomposition.

Contamination des sols : Des résidus persistants de pesticides peuvent s'accumuler dans la matrice du sol, inhibant potentiellement la croissance des plantes et présentant des risques pour les organismes consommant des matières végétales contaminées.

Altération des propriétés du sol : Certains pesticides peuvent modifier la structure du sol, sa capacité de rétention d'eau et d'autres propriétés physico-chimiques, réduisant potentiellement sa fertilité.

● Effets aquatiques

Contamination de l'eau : Le ruissellement des pesticides provenant des champs agricoles peut contaminer les ressources en eau de surface et souterraines, ce qui a un impact négatif sur la vie aquatique et peut potentiellement s'infiltrer dans les sources d'eau potable.

Écotoxicité : Les pesticides peuvent présenter une toxicité pour les organismes aquatiques, entraînant des dommages ou la mortalité chez les poissons, les invertébrés et les algues, perturbant ainsi les écosystèmes aquatiques.

Contamination des sédiments : Les pesticides peuvent se lier aux particules de sédiments, s'accumuler dans les cours d'eau et présenter potentiellement des risques prolongés pour la vie aquatique.

1.4.2. Engrais azotés excessifs

Si la fertilisation azotée peut améliorer la productivité des cultures, son application excessive peut avoir des effets néfastes sur la qualité des sols et de l'eau.

● Effets édaphiques

Acidification des sols : Une application excessive d'azote peut contribuer à l'acidification des sols, influençant la biodisponibilité des nutriments et potentiellement entravant la croissance des plantes.

Déséquilibre nutritif : Des niveaux élevés d'azote peuvent perturber l'équilibre d'autres nutriments essentiels du sol, limitant potentiellement la croissance et le développement des plantes.

Émissions de gaz à effet de serre : Les engrais azotés peuvent contribuer à l'émission de protoxyde d'azote (N2O), un puissant gaz à effet de serre impliqué dans le changement climatique.

● Effets aquatiques

Eutrophisation : Un ruissellement excessif d'azote peut induire une eutrophisation des plans d'eau, caractérisée par des proliférations d'algues, un appauvrissement en oxygène et la mortalité des poissons.

Contamination par les nitrates : Des concentrations élevées de nitrates dans l'eau potable peuvent présenter des risques pour la santé, en particulier pour les nourrissons, entraînant une méthémoglobinémie, une affection altérant le transport de l'oxygène.

Contamination des eaux souterraines : Les nitrates peuvent s'infiltrer dans les eaux souterraines, contaminant les réserves d'eau potable et nécessitant potentiellement des efforts d'assainissement coûteux.

Références

- Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Han, H., & Abdel-Rahman, M. A. (2021). Heavy metals in irrigation water and their impact on soil health and crop productivity: A systematic review. *Science of The Total Environment, 786*, 147571.
- Antoniadis, V., Golia, E. E., & Tsadilas, C. D. (2017). Heavy metals in fertilizers: A review. *Journal of Environmental Management, 201*, 1-10.
- Bajwa, H., Jabar, Z. J., Hussain, M., & Abbas, F. (2019). Environmental legacy of wars: Impact of ordnance on soil, water, and human health. *Environmental Science and Pollution Research, 26*(18), 18029-18042.
- Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Environmental Geochemistry and Health*, *42*(7), 2115-2134.
- Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., ... & Sutton, M. A. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, *320*(5878), 889-892.
- Garbino, H. (2019). The impact of landmines and explosive remnants of war on food security: The Lebanese case. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, *23*(3), 21-26.
- Gozak, N. Y., Trofymenko, O. V., & Dmytruk, Y. V. (2023). Peculiarities of heavy metals accumulation in forage plants and lichens in areas affected by military actions. *Ukrainian Journal of Ecology*, *13*(1), 198-204.
- Okafor-Yarwood, I. M. (2014). Use of depleted uranium weapons in contemporary military interventions. *African Security Review*, *2*(1), 111-125.
- Panagos, P., Karydas, C. G., & Kougias, I. (2018). Soil contamination in former military areas: A review. *Environmental Geochemistry and Health, 40*(3), 963-978.
- Pérez-Izquierdo, J., Vílchez, C., & Santos-Villoslada, J. (2024). A review about the mycoremediation of soil impacted by war-like activities: Challenges and gaps. *Journal of Fungi*, *10*(2), 108.
- Rodríguez-Seijo, A., Arias-Estévez, M., Fernández-Calviño, D., Simal-Gandara, J., & Mejuto, J. C. (2016). Assessment of potential environmental risk by heavy metals in soils from military shooting ranges. *Environmental Pollution*, *216*, 703-711.
- Sakhnenko, V., Semenova, N., Smirnova, O., Kolchanov, O., & Yevchuk, O. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, *13*(10), 1614.
- Savci, S. (2012). An agricultural pollutant: Chemical fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Development*, *3*(1), 71-82
- Skalny, A. V., Aschner, M., Bobrovnitsky, I. P., Chen, P., Tsatsakis, A., Paoliello, M. M., Djordevic, A. B., & Tinkov, A. A. (2021). Environmental and health hazards of military metal pollution. *Environmental Research*, *201*, 111568.

- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, *418*(6898), 671-677.
- Vasiliev, S., & Petrova, A. (2024). Risks of soil pollution with toxic elements during military actions in Lviv. *Journal of Ecological Engineering*, *25*(1), 195-208.
- Zolnikov, T. R., & Schinasi, L. H. (2020). Heavy Metal Toxicity in Armed Conflicts Potentiates AMR in A. baumannii by Selecting for Antibiotic and Heavy Metal Co-resistance Mechanisms. *Frontiers in Public Health*, *7*, 7008767.

2.1. Termes généraux relatifs à la contamination

Contamination

Présence de substances nocives (chimiques, biologiques ou physiques) dans les aliments, le sol ou l'eau au-delà des niveaux acceptables, les rendant impropres à la consommation ou à l'utilisation.

Sécurité alimentaire

Discipline scientifique axée sur la manipulation, la préparation et le stockage des aliments de manière à prévenir la contamination et à garantir leur salubrité pour la consommation humaine.

Limites maximales de résidus (LMR)

Concentration maximale de pesticides ou de contaminants légalement autorisée dans les produits alimentaires, fixée par le Codex Alimentarius, l'UE, la FAO et les réglementations nationales.

Évaluation des risques

Processus d'identification, d'évaluation et de contrôle des dangers potentiels pour l'alimentation et l'agriculture, notamment la contamination causée par les dommages environnementaux liés à la guerre.

2.2. Termes relatifs à la contamination par les métaux lourds

Métaux lourds

Éléments toxiques (p. ex., plomb, cadmium, mercure, arsenic) qui s'accumulent dans le sol et les cultures, présentant de graves risques pour la santé lorsqu'ils sont consommés. Bioaccumulation
Accumulation progressive de métaux lourds ou de substances toxiques dans les plantes, les animaux ou les humains au fil du temps.

Phytoremédiation

Processus utilisant les plantes pour absorber et neutraliser les métaux lourds des sols contaminés.

Contamination au plomb (Pb)

Pollution au plomb dans les céréales causées par les activités militaires, les munitions et les déchets industriels, entraînant des troubles neurologiques et du développement lorsqu'ils sont consommés.

Contamination au cadmium (Cd)

Métal lourd hautement toxique qui s'accumule dans le sol en raison des engrais, des émissions industrielles et des débris de guerre, affectant la fonction rénale et la santé osseuse.

Contamination à l'arsenic (As)

L'arsenic pénètre dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire des pesticides, de la contamination de l'eau et de la pollution liée à la guerre, entraînant des intoxications chroniques et des risques de cancer.

Contamination au mercure (Hg)

La contamination au mercure dans l'agriculture résulte des émissions industrielles, des explosifs et des activités minières, affectant la santé neurologique et le développement du fœtus.

2.3. Contamination par les composés azotés

Composés azotés

Composés chimiques contenant de l'azote (p. ex., nitrates, nitrites, ammoniac) qui, en cas d'utilisation excessive, affectent le sol, l'eau et la santé des plantes.

Pollution par les nitrates (NO_3^-)

Taux élevés de nitrates dans l'eau et le sol, souvent causés par une utilisation excessive d'engrais et des fuites industrielles liées à la guerre, entraînant une contamination de l'eau et des problèmes de santé comme la méthémoglobinémie (« syndrome du bébé bleu »).

Toxicité des nitrites (NO_2^-)

Les nitrites, dérivés des nitrates, sont hautement toxiques et contribuent à la présence de nitrosamines cancérigènes dans les aliments et l'eau potable.

Contamination par l'ammoniac (NH_3)

L'ammoniac provenant du ruissellement agricole, des explosifs et des déchets industriels peut acidifier le sol et l'eau, nuisant à la croissance des plantes et aux écosystèmes aquatiques.

Eutrophisation

Processus par lequel un excès de composés azotés dans les plans d'eau provoque une prolifération d'algues, entraînant un appauvrissement en oxygène et l'effondrement des écosystèmes aquatiques.

Dénitrification

Processus naturel par lequel les microbes transforment les nitrates en azote gazeux, réduisant ainsi les niveaux d'azote dans le sol et prévenant la pollution.

2.4. Terminologie de la contamination par les pesticides

Pesticides

Substances chimiques utilisées pour lutter contre les ravageurs, les mauvaises herbes et les maladies, mais qui peuvent laisser des résidus nocifs dans les aliments et l'environnement.

Pesticides organochlorés (OCP)

Classe de pesticides persistants et toxiques (par exemple, DDT, aldrine, dieldrine) qui s'accumulent dans le sol, l'eau et les chaînes alimentaires.

Pesticides organophosphorés (OP)

Pesticides hautement toxiques (par exemple, chlorpyrifos, malathion) qui affectent le système nerveux et sont soumis à une réglementation européenne stricte.

Onicotinoïdes

Classe d'insecticides systémiques liés au déclin des populations d'abeilles et dont l'utilisation est réglementée par la législation européenne.

Glyphosate

Herbicide largement utilisé (présent dans le Roundup) et surveillé pour ses effets cancérigènes potentiels.

Résidus de pesticides

Infimes traces de pesticides restant dans les aliments après traitement, qui doivent rester inférieures aux limites maximales de résidus (LMR) pour être sûres.

Lutte intégrée contre les ravageurs (LIR)

Approche agricole durable qui minimise l'utilisation de pesticides en combinant des méthodes de lutte biologique, physique et chimique.

2.5. Terminologie de la contamination agricole spécifique aux conflits

Contamination des sols due à la guerre

Pollution des terres agricoles causée par les explosifs, les métaux lourds et la destruction industrielle pendant les conflits.

Contamination par les résidus d'explosifs

Contamination chimique due aux bombes, aux mines et aux débris militaires, affectant la fertilité des sols et la sécurité alimentaire.

Contamination radioactive

Présence de matières radioactives (par exemple, l'uranium provenant des obus à l'uranium appauvri) dans les zones agricoles, affectant la sécurité à long terme des sols et des cultures.

Pollution à l'uranium appauvri (UA)

Métal lourd toxique et radioactif utilisé dans les munitions militaires, qui peut persister dans le sol pendant des décennies, augmentant les risques de cancer et de maladies rénales.

Réhabilitation des terres après un conflit

Processus de restauration des terres agricoles endommagées par la guerre par la décontamination des sols, l'agriculture durable et la restauration environnementale.

2.6. Termes réglementaires internationaux et européens

Codex Alimentarius

Norme mondiale de sécurité alimentaire fixant des limites maximales de résidus de pesticides

Références

- Alexa, E., (2003) Contaminanti in produse vegetale I.S.B.N. 973-620-071-X, Editura Eurobit, Timisoara.
- Alexa, E. (2008) Contaminanţi în produse horticole si cerealiere, ISBN 978-973-729-152-3. Editura SOLNESS, Timişoara.
- Brhane, G., Dargo, H. (2014). Assessment of some heavy metals contamination in some vegetable and canned foods: A review. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, *1(9),* 1394- 1403.
- Elzwayie, A., Afan, H.A., Allawi, M.F., El-Shafie, A.(2017). Heavy metal monitoring, analysis and prediction in lakes and rivers: State of the art. *Environmental Science and Pollution Research, 24(13),* 12104-12117
- Gallart-Mateu, D., Armenta, S., de la Guardia, M. (2014). Implementing the contamination prevention programs in the pesticide industry by infrared spectroscopy. Talanta, 119, 312-319
- Gomaa, N.A.R. (2022). Heavy metals, definition, sources of food contamination, incidence, impacts and remediation A literature review with recent updates. *Egyptian Journal of Chemistry, 65(1),* 419 - 437
- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., et al. (2019). A review on heavy metals contamination in soil: Effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, *28(4)*, 380-394.
- Morrissy, J.G., Currell, .J., Reichman, S.M., Surapaneni, A., Mallavarapu, M., Crosbie, N., Hirth, D., Aquiliona, S., Rajendram, W., Ball, A. (2021). Nitrogen contamination and bioremediation in groundwater and the environment: A review. Earth-Science Reviews, 222, 103816.
- Su, C. (2014). A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques. *Environmental Skeptics and Critics*, *3(2),* 24
- Vryzas, Z. (2018). Pesticide fate in soil-sediment-water environment in relation to contamination preventing actions. Current Opinion in Environmental Science & Health, 4, 5-9
- Yadav, I.C., Devi, N. L. (2017). Pesticides classification and its impact on human and environment. Environmental Science & Engineering, 6, 141–154.

Chapitre 3. Contexte international du conflit ukrainien et législation nationale et européenne

La guerre en Ukraine a perturbé l'agriculture mondiale, l'Ukraine étant l'un des plus grands exportateurs mondiaux de blé, de maïs et d'orge. Le conflit a entraîné une dégradation des sols, une contamination due aux activités militaires, des restrictions commerciales et des problèmes de sécurité alimentaire.

3.1 Principaux impacts internationaux :

<u>Sécurité alimentaire et approvisionnement mondial en céréales</u>

● L'Ukraine, avec la Russie, représente environ 30 % des exportations mondiales de blé. La guerre a perturbé les chaînes d'approvisionnement, entraînant une hausse des prix des denrées alimentaires et des pénuries de céréales, notamment en Afrique et au Moyen-Orient.

● L'Initiative céréalière de la mer Noire, négociée par l'ONU et la Turquie, visait à garantir un passage sûr pour les exportations de céréales, mais son échec a accentué la pression sur les marchés alimentaires mondiaux.

Contamination environnementale et agricole

● Les métaux lourds, les résidus de carburant et les munitions non explosées provenant d'activités militaires ont pollué les terres agricoles ukrainiennes, augmentant les risques de contamination des céréales.

● Les bombardements à grande échelle et la destruction des terres ont entraîné une dégradation des sols, affectant la productivité agricole à long terme.

Perturbations du commerce agricole et des chaînes d'approvisionnement

● Les blocus portuaires et les dommages aux infrastructures ont limité la capacité de l'Ukraine à exporter des céréales, la forçant à recourir à des itinéraires alternatifs via la Pologne, la Roumanie et les États baltes.

● Les sanctions contre la Russie ont perturbé l'approvisionnement en engrais et en produits agrochimiques, affectant la production agricole mondiale.

3.2 Législation nationale ukrainienne sur la contamination et la sécurité alimentaire

Le cadre réglementaire de l'Ukraine est conforme aux normes de l'Union européenne (UE), dans le cadre de ses efforts en vue de son adhésion à l'UE et de la conformité du commerce agricole. Les principaux domaines d'intervention comprennent l'utilisation des pesticides, la lutte contre la pollution par les nitrates et la réglementation sur la contamination par les métaux lourds. Principales lois et réglementations ukrainiennes

Loi sur les pesticides et les produits agrochimiques (2002, modifiée)

● Réglemente l'utilisation, l'enregistrement et l'élimination des pesticides et des engrais

● Exige le respect des limites de résidus de l'UE dans les produits alimentaires

Loi sur la protection de l'environnement (1991, modifiée)

● Définit la réglementation sur la pollution des sols, la contamination chimique et la gestion des déchets industriels

● Fixe des normes pour la contamination par les métaux lourds et les nitrates dans l'agriculture

Loi sur la sécurité et l'hygiène alimentaires (2014, modifiée pour s'aligner sur les normes de l'UE)

● Fixe des limites maximales de résidus (LMR) pour les pesticides et les contaminants

● Réglemente la production, le stockage et la distribution des aliments pour le marché intérieur et l'exportation

Plan d'action national pour la réduction de la pollution par les nitrates

● Met en œuvre des mesures visant à prévenir le ruissellement excessif de composés azotés dans les sols et les eaux

● Soutient les agriculteurs dans l'adoption de techniques de fertilisation durables

Stratégie pour une agriculture et un développement rural durables (2020-2030)

● Encourage des pratiques agricoles résilientes au changement climatique et respectueuses de l'environnement

● Encourage l'agriculture de précision et la biorestauration pour réduire les risques de contamination

3.3 Législation et réglementation européennes sur la contamination agricole

Alors que l'Ukraine cherche à se rapprocher de l'UE, elle doit se conformer aux lois européennes strictes en matière de sécurité alimentaire, de protection de l'environnement et de commerce. Principaux règlements de l'UE relatifs à la contamination des céréales :

Règlements de l'UE sur les pesticides et les produits agrochimiques

- Règlement (CE) n° 1107/2009 – Régit l'autorisation et l'utilisation des pesticides dans l'UE
- Règlement (UE) n° 2019/1381 – Introduit une transparence plus stricte dans l'évaluation des risques alimentaires

Impact sur l'Ukraine :

● Les exportations de céréales ukrainiennes vers l'UE doivent respecter les limites de résidus de pesticides prévues par le règlement (CE) n° 396/2005

● L'Ukraine doit éliminer progressivement les pesticides interdits dans l'UE, tels que les néonicotinoïdes

Règlements de l'UE sur les nitrates et les métaux lourds

- Directive sur les nitrates (91/676/CEE) – Limite la pollution par les composés azotés des masses d'eau
- Règlement (UE) n° 2023/915 sur les métaux lourds dans les denrées alimentaires – Fixe des limites strictes pour le cadmium, le plomb et l'arsenic dans les céréales

Impact sur l'Ukraine :

● Les agriculteurs doivent mettre en œuvre les meilleures pratiques de gestion (MPG) pour réduire l'azote Ruissellement

● Le respect des seuils de métaux lourds de l'UE est nécessaire pour les exportations.

Législation européenne sur la sécurité alimentaire et le commerce

- Législation alimentaire générale (Règlement (CE) n° 178/2002) – Établit les bases de la politique européenne de sécurité alimentaire.
- Limites maximales de résidus (LMR) de contaminants dans les aliments (Règlement (CE) n° 1881/2006, mis à jour en 2022) – Fixe des limites pour les contaminants dans les céréales.

Impact sur l'Ukraine :

● Les producteurs céréaliers ukrainiens doivent effectuer des tests de contamination avant l'exportation.

● Une traçabilité stricte est requise pour respecter les normes HACCP et de certification de la sécurité alimentaire.

Politiques européennes en matière d'agriculture durable et de Pacte vert.

- Stratégie « De la ferme à la table » (2020) – Vise à réduire l'utilisation de pesticides et d'engrais de 50 % d'ici 2030.
- Politique agricole commune (PAC) 2023-2027 – Soutient l'agriculture respectueuse de l'environnement par le biais de subventions.

Impact sur l'Ukraine :

● L'Ukraine doit aligner ses pratiques agricoles durables avec les objectifs du Pacte vert de l'UE

Références

- Alexa, E., (2003) Contaminanti in produse vegetale I.S.B.N. 973-620-071-X, Editura Eurobit, Timisoara.
- Alexa, E. (2008) Contaminanţi în produse horticole si cerealiere, ISBN 978-973-729-152-3. Editura SOLNESS, Timişoara.
- *Cabinet of Ministers of Ukraine. (Various decrees aligning with EU MRLs for pesticides). Official Gazette of Ukraine.*
- Cabinet of Ministers of Ukraine. (Various decrees aligning with EU MRLs for pesticides). *Official Gazette of Ukraine*.
- Council of the European Communities. (1991). *Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources*. Official Journal of the European Communities, L 375, 1-8.
- Datsko, O., Melnyk, O., Kovalenko, I., Butenko, A., Zakharchenko, E., Ilchenko, V., Onychenko, V., & Solokha, M. (2025). Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils. *Notulae Botanicae Horti Cluj-Napoca*, *53*(1), 14328.
- Didenko, N. O. (2024). SOIL DAMAGE AND RECOVERY IN UKRAINE: LESSONS FROM GLOBAL POST-WAR EXPERIENCES. *Land Reclamation and Water Management*, (2), 79-86.
- ERS USDA (Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture). (2023, September). *Global Fertilizer Market Challenged by Russia's Invasion of Ukraine*
- European Commission. (2006). *Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs*. Official Journal of the European Union, L 364, 5-24
- European Commission. (2006). *Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs*. Official Journal of the European Union, L 364, 5-24.
- European Commission. (2020). *A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system*.
- European Commission. (2022). *Commission Regulation (EU) 2022/1370 of 4 August 2022 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of certain contaminants in foodstuffs*. Official Journal of the European Union, L 206, 12–25
- European Commission. (2023). *EU-Ukraine Solidarity Lanes*
- European Parliament and Council. (2005). *Regulation (EC) No 396/2005 of 23 February 2005 on maximum residue levels of pesticides in or on food and feed of plant and animal origin and amending Council Directive 91/414/EEC*. Official Journal of the European Union, L 70, 1-16.
- European Parliament and Council. (2021). *Regulation (EU) 2021/2115 of the European Parliament and of the Council of 2 December 2021 establishing rules on support for strategic plans to be drawn up by Member States under the Common agricultural policy (CAP Strategic Plans) and financed by the European Agricultural Guarantee Fund (EAGF) and by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and repealing Regulations (EU) No 1305/2013 and (EU) No 1307/2013*. Official Journal of the European Union, L 435, 1-186.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2022). *The impact of the war in Ukraine on global food security and related matters under the mandate of FAO*.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2023). *The importance of Ukraine and the Russian Federation for global agricultural markets and the risks associated with the conflict*.

- *IFPRI (International Food Policy Research Institute). (2023). How sanctions on Russia and Belarus are impacting exports of agricultural products and fertilizer.*
- Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine. (2020). *Strategy for Sustainable Agriculture and Rural Development 2020-2030*.
- *Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine. (Various National Action Plan documents on Nitrate Pollution Reduction)*
- Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (Various regulations and standards on heavy metal and nitrate contamination in agriculture). *Official Gazette of Ukraine*.
- Pavlo Martyshev, Oleg Nivievskyi, Mariia Bogonos - https://www.ifpri.org/blog/regional-war-global-consequences-mounting-%20damages-ukraines-agriculture-and-growing-challenges/
- Sytar, O., & Taran, N. (2022). Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine–a review. *Journal of Central European Agriculture*, *23*(4), 881-887.
- UN (United Nations). (2022). *Black Sea Grain Initiative*.
- *Verkhovna Rada of Ukraine. (1991). Law of Ukraine on Environmental Protection (with amendaments)*
- *Verkhovna Rada of Ukraine. (2002). Law of Ukraine on Pesticides and Agrochemicals (with amendaments)*
- *Verkhovna Rada of Ukraine. (2014). Law of Ukraine on Food Safety and Hygiene (with amendaments).*
- World Bank. (2022). *The impact of the war in Ukraine on global commodity markets*

Chapitre 4. Mesures nécessaires pour réduire la contamination des céréales

Les céréales sont un élément fondamental de l'approvisionnement alimentaire mondial, mais leur contamination par des substances nocives, notamment les pesticides, les métaux lourds et les composés azotés, présente des risques sanitaires et environnementaux importants. Pour garantir la sécurité alimentaire et la durabilité, il est essentiel de mettre en œuvre des mesures efficaces qui minimisent la contamination à chaque étape de la production, de la gestion des sols et de la fertilisation à la récolte, au stockage et à la transformation.

4.1. Mesures visant à réduire la teneur en pesticides des céréales et des produits céréaliers

<u>Application des bonnes pratiques agricoles (BPA) pendant la production céréalière</u>

Les produits phytosanitaires sont des « pesticides » qui protègent les cultures ou les plantes utiles ou désirables. Ils sont utilisés en agriculture comme dans d'autres secteurs. Ils contiennent au moins une substance active pour protéger les plantes ou les produits végétaux contre les ravageurs et les maladies, et améliorer la productivité au champ et après la récolte, tout en évitant la contamination par les mycotoxines produites par certaines espèces fongiques, potentiellement présentes dans les produits dérivés. Les pesticides comprennent, entre autres : herbicides, fongicides, insecticides, acaricides, nématicides, molluscicides, régulateurs de croissance, répulsifs, rodenticides et biocides, ainsi qu'une large gamme de composés chimiques de synthèse.

L'utilisation de pesticides est autorisée en agriculture raisonnée, contrairement à l'agriculture biologique. L'utilisation de pesticides en agriculture raisonnée doit être effectuée selon la lutte intégrée (LIR). Cette dernière prend en compte les principes agronomiques, mécaniques, physiques et

biologiques, et recourt à une utilisation sélective de pesticides de synthèse lorsque les situations ne peuvent être gérées efficacement par d'autres moyens. La rotation des cultures, l'utilisation de cultivars résistants/tolérants et de semences certifiées, ainsi que l'utilisation d'organismes bénéfiques sont des pratiques courantes pour minimiser les applications de produits chimiques.

Lors de l'utilisation de pesticides, il est nécessaire de respecter leurs limites maximales de résidus (LMR), telles qu'elles sont appliquées par différents organismes compétents, et conformément aux « Bonnes Pratiques Agricoles ». Des stratégies anti-résistance doivent également être appliquées pour optimiser l'efficacité des pesticides en réduisant leur utilisation.

Globalement, la surveillance des ravageurs, basée sur des observations sur le terrain, des méthodes de diagnostic classiques et moléculaires, ainsi que des systèmes de prévision, permet de planifier la lutte antiparasitaire en tenant compte des seuils d'intervention adaptés à la culture et aux conditions climatiques de la zone de référence. Plus précisément, des méthodes telles que l'imagerie hyper-spectrale et les tests PCR permettent une détection rapide et précise des agents pathogènes, permettant ainsi de prendre des mesures préventives avant l'apparition des maladies. De nouvelles technologies font leur apparition dans la gestion des céréales.

Compte tenu de l'imprévisibilité des conditions météorologiques, il est souvent difficile d'estimer les effets des maladies à chaque saison. De nouveaux outils permettant de prédire les risques de maladies, d'élaborer des mesures de contrôle appropriées et d'améliorer la prise de décision en matière de gestion des maladies des céréales sont disponibles. Ces outils peuvent aider les producteurs à être proactifs plutôt que réactifs en matière de gestion des maladies. Néanmoins, les technologies de télédétection, telles que l'imagerie par satellite et par drone, et l'IoT offrent un moyen abordable de surveiller et de gérer les maladies à grande échelle.

Les agents de lutte biologique et les substances naturelles, notamment les inducteurs de résistance, peuvent limiter la gravité des agents pathogènes des céréales, limitant ainsi le recours aux produits pharmaceutiques. Les stratégies de protection intégrée des céréales contre les ravageurs et les maladies doivent également tenir compte du risque d'infection de ces cultures par des maladies fongiques produisant des mycotoxines, susceptibles de contaminer les céréales et leurs produits dérivés. Selon des études récentes, les mycotoxines les plus importantes présentes sur les céréales sont le déoxynivalénol (DON), la zéaralénone (ZEN), les aflatoxines (AF), l'ochratoxine A (OTA), les toxines T-2/HT-2 et les fumonisines (FUM). Ces métabolites secondaires sont produits par diverses espèces de champignons appartenant essentiellement aux genres Aspergillus, Penicillium et Fusarium. La surveillance de ces agents pathogènes fongiques sur le terrain permet de mieux planifier les stratégies de protection afin d'éviter la contamination des céréales et de leurs produits par les mycotoxines. Diverses préparations ménagères et industrielles, telles que le lavage, le blanchiment, l'épluchage et les traitements thermiques, se sont avérées efficaces pour réduire les résidus de pesticides.

De nouvelles technologies telles que le plasma froid, le champ électrique pulsé, l'irradiation et les ultrasons ont été appliquées pour dégrader les résidus de pesticides et les mycotoxines, selon le type de pesticide et les paramètres de transformation. Leur dissipation peut également se produire lors des opérations de mouture et de cuisson. Il est donc essentiel de gérer correctement les cultures au champ

afin d'éviter l'accumulation de résidus de pesticides et de mycotoxines après la récolte et dans les produits dérivés.

La réduction des contaminants dans les céréales nécessite une approche globale incluant :

● Pratiques agricoles durables : Utilisation de techniques agricoles respectueuses de l'environnement pour limiter l'accumulation de substances nocives.

● Technologies d'agriculture de précision : Mise en œuvre de systèmes de surveillance basés sur l'IA pour optimiser l'application d'engrais et de pesticides.

● Conformité réglementaire : Garantir le respect des normes de sécurité alimentaire et des directives environnementales.

● Traitement et analyses post-récolte : Application de techniques avancées de nettoyage et de détoxification des grains, ainsi que de tests en laboratoire pour détecter et éliminer les contaminants.

En intégrant ces mesures, la production céréalière peut devenir plus sûre, plus durable et plus conforme aux objectifs mondiaux de sécurité alimentaire.

4.1.1. Lutte intégrée contre les ravageurs (LIR)

La LIR est une approche globale combinant diverses méthodes de lutte antiparasitaire afin de minimiser l'utilisation de pesticides. Elle comprend :

● Lutte biologique : Utilisation de prédateurs naturels et de micro-organismes pour supprimer les populations de ravageurs.

● Pratiques agronomiques : Rotation des cultures, cultures intercalaires et variétés résistantes pour réduire les infestations de ravageurs.

● Lutte mécanique : Pièges, barrières et élimination manuelle des ravageurs.

● Lutte chimique en dernier recours : Application de pesticides uniquement lorsque cela est nécessaire et à doses minimales.

4.1.2. Sélection de pesticides respectueux de l'environnement

Au lieu des pesticides chimiques traditionnels, des alternatives plus sûres devraient être utilisées :

● Biopesticides : Dérivés de sources naturelles telles que des bactéries, des champignons ou des extraits de plantes.

● Produits chimiques à faible toxicité : Pesticides à dégradation rapide dans l'environnement et impact minimal sur les espèces non ciblées.

● Application de précision : Techniques de pulvérisation ciblées pour éviter une utilisation excessive de pesticides.

4.1.3. Optimisation des méthodes et du calendrier d'application des pesticides

Une utilisation appropriée des pesticides permet de réduire les résidus dans le produit final :

● Respect des doses recommandées : Éviter les applications excessives.

● Respect des conditions météorologiques : Appliquer les pesticides dans des conditions météorologiques optimales pour éviter la dérive et le ruissellement.

● Délais avant récolte : Assurer une période suffisante pour la dégradation des pesticides avant la récolte.

4.1.4. Surveillance des résidus de pesticides dans le sol et l'eau

Afin de prévenir l'accumulation de pesticides et la contamination de l'environnement, les mesures suivantes doivent être mises en œuvre :

● Zones tampons : Zones de végétation à proximité des plans d'eau pour absorber le ruissellement des pesticides.

● Gestion des sols : Analyses régulières et recours à des techniques de bioremédiation pour éliminer les résidus de pesticides.

● Systèmes de filtration de l'eau : Prévenir la contamination des sources d'eau d'irrigation et d'eau potable.

4.1.5. Traitement post-récolte et détoxification des céréales

Plusieurs techniques permettent de réduire les résidus de pesticides dans les céréales récoltées :

● Nettoyage et lavage : Élimine les résidus de surface.

● Traitement thermique : Traitement thermique pour dégrader les pesticides.

● Ozonation et traitement UV : Méthodes sans produits chimiques pour décomposer les molécules de pesticides.

4.1.6. Surveillance et contrôle en laboratoire

Des analyses régulières garantissent la sécurité des céréales avant leur arrivée au consommateur :

● Analyses chromatographiques et spectrométriques : Détection des résidus de pesticides dans les échantillons de céréales.

● Échantillonnage aléatoire : Réalisé à différentes étapes (champ, stockage, distribution).

● Conformité aux limites réglementaires : S'assurer que les résidus de pesticides ne dépassent pas les niveaux de sécurité.

4.1.7. Mise en œuvre de l'agriculture biologique

La transition vers l'agriculture biologique réduit l'utilisation de pesticides :

● Utilisation de compost et d'engrais organiques : Amélioration naturelle de la fertilité des sols. ● Utilisation de méthodes naturelles de lutte antiparasitaire : insectes utiles, plantes compagnes et biopesticides.

● Évitement des produits chimiques de synthèse : seules des substances biologiques approuvées sont utilisées.

Programmes de formation et de sensibilisation des agriculteurs

L'éducation est essentielle pour réduire l'utilisation des pesticides :

● Ateliers et séminaires : enseignement des meilleures pratiques d'application des pesticides et des méthodes alternatives.

● Fermes de démonstration : démonstration de l'efficacité des techniques durables.

● Directives accessibles : fourniture aux agriculteurs de stratégies claires de réduction des pesticides.

4.1.8. Sensibilisation des consommateurs et recommandations en matière de sécurité alimentaire

Les consommateurs peuvent également prendre des mesures pour minimiser leur exposition aux pesticides :

● Lavage et épluchage appropriés : réduction des résidus de pesticides en surface.
● Choix de produits certifiés biologiques : réduction des niveaux de pesticides.
● Utilisation de méthodes de cuisson réduisant l'utilisation de pesticides : certains pesticides se dégradent à la chaleur.

4.1.9. Renforcement du contrôle et de la certification gouvernementaux

Une réglementation efficace garantit le respect des normes de sécurité :
● Harmonisation avec les normes internationales (par exemple, UE, Codex Alimentarius).
● Inspections régulières des exploitations agricoles et des installations de stockage.
● Sanctions plus sévères en cas d'utilisation excessive de pesticides et de contamination.
● Encouragement des programmes de certification pour les céréales sans pesticides ou biologiques.
La mise en œuvre de ces mesures réduira les résidus de pesticides dans les cultures céréalières, protégera la santé humaine et favorisera une agriculture respectueuse de l'environnement.

4.2. Mesure visant à réduire la contamination des céréales et des produits céréaliers par les métaux lourds

Bonnes pratiques agricoles lors de la production céréalière

Les mesures d'atténuation des risques liés à la présence de métaux lourds comprennent l'analyse des sols et une éventuelle remédiation par phytoremédiation, la rotation des céréales avec des cultures absorbant les métaux lourds, ou l'ajout d'amendements tels que la chaux, le biochar ou la matière organique pour réduire la biodisponibilité des métaux.
Il est également recommandé de contrôler les intrants utilisés pendant la production, en vérifiant notamment que l'eau d'irrigation est exempte de contamination par des métaux tels que le cadmium et le plomb. Les engrais phosphatés riches en cadmium doivent également être évités et les engrais organiques (comme le fumier) doivent être testés pour détecter toute contamination métallique.

Mesures à prendre lors de la transformation des céréales

La surveillance des chaînes d'approvisionnement est cruciale : les matières premières et les produits transformés sont régulièrement analysés pour détecter la présence de métaux lourds.

4.2.1. Contrôle des sources de contamination

● Surveillance régulière des sols, de l'eau et de l'air pour identifier les sources de métaux lourds.
● Détection et restriction des engrais, pesticides et eaux usées contaminés en agriculture.

4.2.2. Analyse agrochimique du sol

● Analyse périodique de la teneur en métaux lourds du sol.
● Utilisation exclusive d'engrais et de composts certifiés à faible teneur en éléments toxiques.

4.2.3. Chaulage et application d'engrais organiques

● Utilisation de chaux pour réduire la biodisponibilité des métaux lourds dans le sol.
● Application de matière organique (humus, biochar) pour lier les métaux lourds et réduire leur mobilité.

4.2.4. Culture de cultures résistantes à l'accumulation de métaux lourds

● Utilisation de variétés et d'hybrides présentant une faible capacitée d'accumulation de métaux lourds dans les céréales.

4.2.5. Phytoremédiation – Épuration biologique des sols

● Culture de plantes de phytoremédiation (tournesol, moutarde, luzerne) pour absorber et éliminer les métaux lourds du sol.

4.2.6. Sélection appropriée des champs de culture

● Éviter la culture de céréales sur des terres contaminées ou industrielles.
● Surveillance des zones proches des zones industrielles et des autoroutes.

4.2.7. Contrôle et épuration de l'eau d'irrigation

● Analyse de la teneur en métaux lourds de l'eau d'irrigation.
● Utilisation de systèmes de filtration et d'autres technologies de purification de l'eau.

4.2.8. Optimisation des technologies de stockage et de transformation des céréales

● Utilisation de matériaux de stockage sûrs pour éviter tout contact avec des surfaces métalliques susceptibles de libérer des éléments toxiques.
● Élimination de la contamination de surface par nettoyage et lavage avant transformation.

4.2.9. Contrôle en laboratoire de la qualité des produits céréaliers

● Surveillance régulière de la teneur en métaux lourds des céréales, de la farine, des céréales et autres produits.
● Application de normes de sécurité conformes aux réglementations nationales et internationales.

4.2.10. Réglementation et contrôle gouvernemental

● Mise en œuvre de réglementations environnementales plus strictes et contrôle de leur conformité.
● Introduction de la certification des produits concernant la teneur en métaux lourds.

4.2.11. Développement de l'agriculture biologique

● Encourager la transition vers des méthodes agricoles respectueuses de l'environnement.
● Éviter les engrais et pesticides de synthèse susceptibles de contenir des métaux lourds.

La mise en œuvre de ces mesures contribuera à réduire la contamination des cultures céréalières par les métaux lourds, à améliorer la sécurité alimentaire et à minimiser l'impact négatif sur la santé humaine et l'environnement.

4.3. Mesures visant à réduire les composés azotés dans les céréales et les produits céréaliers

Des composés azotés tels que les nitrates, les nitrites et les amines biogènes peuvent s'accumuler dans les céréales et les produits céréaliers en raison des pratiques agricoles, de la contamination environnementale ou de l'activité microbienne pendant la transformation et le stockage. Si certains composés azotés sont des indicateurs bénéfiques de la teneur en protéines, d'autres, surtout en quantités excessives, peuvent présenter des risques pour la santé.

Pour garantir la sécurité et la qualité des aliments, il est essentiel de mettre en œuvre des stratégies efficaces visant à réduire les composés azotés indésirables. Ces stratégies comprennent l'optimisation

des pratiques de fertilisation, la sélection de variétés de céréales à faible absorption, l'amélioration des manipulations après récolte, le contrôle des conditions de stockage (température, humidité et ventilation) et l'application de méthodes de transformation ciblées qui inhibent la croissance microbienne et la dégradation enzymatique. Ensemble, ces mesures contribuent à des produits céréaliers plus sûrs et plus sains, tout en soutenant des systèmes agricoles et de productions durables.

Bonnes pratiques agricoles pour la production céréalière

Les mesures d'atténuation comprennent l'utilisation de techniques d'agriculture de précision, où le sol est régulièrement analysé pour surveiller les niveaux d'azote et la fertilisation est ajustée en conséquence, en appliquant uniquement la quantité nécessaire d'engrais azoté et en privilégiant les engrais à libération lente ou organiques pour minimiser le ruissellement d'azote.

De bonnes pratiques pour maintenir la matière organique du sol, l'utilisation de compost et d'engrais verts pour améliorer la rétention d'azote, et la rotation des cultures avec des légumineuses pour fixer naturellement l'azote dans le sol peuvent également contribuer à la lutte contre la pollution.

L'irrigation contrôlée au goutte-à-goutte peut également contribuer à prévenir le lessivage de l'azote dans les eaux souterraines.

Enfin, l'utilisation d'inhibiteurs de nitrification avec les engrais peut ralentir la conversion de l'ammonium en nitrate, réduisant ainsi les pertes d'azote.

Mesures à prendre lors de la transformation des céréales

Il est important de veiller à ce que les céréales soient stockées dans des conditions de faible humidité afin de réduire la dégradation microbienne et la formation de composés azotés toxiques.

Des techniques de détoxification telles que le trempage, la germination, les traitements thermiques et la fermentation (par exemple, la fermentation au levain) peuvent également être utilisées pour réduire certains composés azotés.

4.3.1. Optimisation de la fertilisation azotée

● Application d'engrais en fonction des besoins des plantes et de l'analyse du sol pour prévenir l'accumulation excessive d'azote.

● Utilisation d'engrais azotés à libération lente et stabilisés pour réduire le lessivage des nitrates.

4.3.2. Rotation des cultures et intégration des légumineuses

● Intégration de légumineuses fixatrices d'azote dans les rotations culturales pour enrichir naturellement le sol en azote et réduire l'utilisation d'engrais de synthèse.

● Alternance de cultures céréalières et de plantes à racines profondes pour améliorer l'absorption d'azote.

4.3.3. Agriculture de précision et techniques de fertilisation intelligente

● Mise en œuvre de technologies d'agriculture de précision (drones, capteurs, IA) pour optimiser l'application d'engrais azotés.

● Utilisation de l'application à débit variable (VRA) pour distribuer efficacement l'azote en fonction des besoins des plantes en temps réel.

4.3.4. Utilisation d'inhibiteurs de nitrification

● Ajout d'inhibiteurs de nitrification aux engrais pour ralentir la conversion de l'azote et réduire le lessivage des nitrates dans les eaux souterraines.

4.3.5. Gestion contrôlée de l'irrigation

● Éviter une irrigation excessive, susceptible de lessiver les composés azotés du sol.

● Mise en œuvre de l'irrigation goutte à goutte et d'autres technologies économes en eau pour minimiser le ruissellement d'azote.

4.3.6. Fertilisation organique et compostage

● Remplacement des engrais de synthèse par du compost, du fumier et d'autres engrais organiques libérant l'azote plus progressivement.

● Stimulation de l'activité microbienne du sol pour améliorer l'efficacité de l'azote.

4.3.7. Amélioration de la santé des sols et cultures de couverture

● Culture de cultures de couverture (par exemple, trèfle, moutarde) pour absorber l'excès d'azote et prévenir le lessivage des nitrates.

● Augmentation de la matière organique du sol pour améliorer la rétention d'azote.

4.3.8. Techniques appropriées de stockage et de transformation des céréales

● Assurer des conditions optimales de séchage et de stockage pour éviter les transformations des composés azotés susceptibles d'augmenter les nitrates dans les céréales.

● Lavage et transformation des céréales pour éliminer les contaminants de surface.

4.3.9. Surveillance et analyses en laboratoire

● Analyse régulière d'échantillons de sol, d'eau et de céréales pour surveiller les concentrations de nitrates et de composés azotés.

● Conformité aux réglementations de sécurité alimentaire concernant les concentrations acceptables de composés azotés dans les produits céréaliers.

4.3.10. Politiques réglementaires et mesures de protection de l'environnement

● Renforcement de la réglementation gouvernementale sur l'utilisation des engrais azotés.

● Encouragement des programmes de certification pour les céréales et les produits céréaliers à faible teneur en nitrates.

La mise en œuvre de ces mesures permet de réduire considérablement la contamination des céréales et des produits céréaliers par les composés azotés, améliorant ainsi la sécurité alimentaire et la durabilité environnementale.

Références

- Abdelhamied, A. S., Selim, E. M. M., & Mosaad, I. S. (2024). Modified Slow-Release Urea Fertilizers on Yield and Nitrogen Use Efficiency of Wheat Crop (Triticum aestivum L) for Safe and Sustainable Agricultural System. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 55(22), 3497-3509.

- Ali, A., Guo, D., Jeyasundar, P. G. S. A., Li, Y., Xiao, R., Du, J., ... & Zhang, Z. (2019). Application of wood biochar in polluted soils stabilized the toxic metals and enhanced wheat (Triticum aestivum) growth and soil enzymatic activity. Ecotoxicology and environmental safety, 184, 109635.
- Bai, G., Su, Z., & Cai, J. (2018). Wheat resistance to Fusarium head blight. Canadian Journal of Plant Pathology, 40(3), 336-346.
- Chełkowski, J. (2010). Fusarium head blight of wheat: pathogenic species and their mycotoxins. World Mycotoxin Journal, 3(2), 107-119.
- Conservation agriculture based integrated crop management sustains productivity and economic profitability along with soil properties of the maize-wheat rotation. Scientific reports, 12(1), 1962.
- de Chaves, M. A., Reginatto, P., da Costa, B. S., de Paschoal, R. I., Teixeira, M. L., & Fuentefria, A. M. (2022). Fungicide resistance in Fusarium graminearum species complex. Current Microbiology, 79(2), 62.
- Deguine, J. P., Aubertot, J. N., Flor, R. J., Lescourret, F., Wyckhuys, K. A., & Ratnadass, A. (2021). Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. Agronomy for Sustainable Development, 41(3), 38.
- Fărcaș, A. C. (2024). Food Safety in Cereal Grains: Contaminants, Legislation, and Mitigation Strategies. DOI: 10.5772/intechopen.1007523.
- Hendrichs, J., Pereira, R., & Vreysen, M. J. (2021). Area-wide integrated pest management: development and field application (p. 1028). Taylor & Francis.
- Hrynko, I., Kaczyński, P., Łuniewski, S., & Łozowicka, B. (2023). Removal of triazole and pyrethroid pesticides from wheat grain by water treatment and ultrasound-supported processes. Chemosphere, 333, 138890.
- Islam, T. (2022). An integrated pest management program for managing fusarium head blight disease in cereals. Journal of integrative Agriculture, 21(12), 3434-3444.
- Joshi, P., Sandhu, K. S., Dhillon, G. S., Chen, J., & Bohara, K. (2024). Detection and monitoring wheat diseases using unmanned aerial vehicles (UAVs). Computers and Electronics in Agriculture, 224, 109158.
- Khan, B. A., Nadeem, M. A., Nawaz, H., Amin, M. M., Abbasi, G. H., Nadeem, M., Ali, M., Ameen, M., Javaid, M. M., Maqbool, R., Ikram, M., & Ayub M. A. (2023). Pesticides: impacts on agriculture productivity, environment, and management strategies. In Emerging contaminants and plants: Interactions, adaptations and remediation technologies (pp. 109-134). Cham: Springer International Publishing.
- Kuzdraliński, A., Kot, A., Szczerba, H., Nowak, M., & Muszyńska, M. (2017). A review of conventional PCR assays for the detection of selected phytopathogens of wheat. Journal of molecular microbiology and biotechnology, 27(3), 175-189.
- Lykogianni, M., Bempelou, E., Karamaouna, F., & Aliferis, K. A. (2021). Do pesticides promote or hinder sustainability in agriculture? The challenge of sustainable use of pesticides in modern agriculture. Science of the Total Environment, 795, 148625.

- Ma, Q., Liu, W., Zhai, G., Zhu, N., Gu, Y., Liu, H., ... & Zhu, X. (2025). Effect of slow-release nitrogen fertilizer on the vertical distribution of root and soil nutrients in the middle and later stage of wheat. Plant and Soil, 1-16.
- Pérez, A. L., & Anderson, K. A. (2009). DGT estimates cadmium accumulation in wheat and potato from phosphate fertilizer applications. Science of the total environment, 407(18), 5096-5103.
- Pooniya, V., Zhiipao, R. R., Biswakarma, N., Kumar, D., Shivay, Y. S., Babu, S., Das, K., A. K. Choudhary, Swarnalakshmi, K., Jat, R. D., Choudhary, R. L., Ram, H., Khokhar, M. K., Mukri, G., Lakhena, K. K., Puniya, M. M., Jat, R., Muralikrishnan, L., Singh A. K., & Lama, A. (2022).
- Sadhasivam, S., Britzi, M., Zakin, V., Kostyukovsky, M., Trostanetsky, A., Quinn, E., & Sionov, E. (2017). Rapid detection and identification of mycotoxigenic fungi and mycotoxins in stored wheat grain. Toxins, 9(10), 302.
- Sereda, I., Danilov, R., Kremneva, O., Zimin, M., & Podushin, Y. (2023). Development of Methods for Remote Monitoring of Leaf Diseases in Wheat Agrocenoses. Plants, 12(18), 3223.
- Simão, L. M., Cruppe, G., Michaud, J. P., Schillinger, W. F., Diaz, D. R., Dille, A. J., ... & Lollato, R. P. (2024). Beyond grain: Agronomic, ecological, and economic benefits of diversifying crop rotations with wheat. Advances in agronomy, 186, 51-112.
- Simpson, D. R., Weston, G. E., Turner, J. A., Jennings, P., & Nicholson, P. (2001). Differential control of head blight pathogens of wheat by fungicides and consequences for mycotoxin contamination of grain. European Journal of Plant Pathology, 107, 421-431.
- Sojithamporn, P., Leksakul, K., Sawangrat, C., Charoenchai, N., & Boonyawan, D. (2023). Degradation of pesticide residues in water, soil, and food products via cold plasma technology. Foods, 12(24), 4386.
- Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. International journal of environmental research and public health, 18(3), 1112.
- Wang, G., Hu, F., Li, H., Yin, W., Fan, Z., Fan, H., ... & Chai, Q. (2025). Optimal green manure application reduces nitrogen losses, enhances wheat grain yield, and improves nitrogen use efficiency. Journal of Integrative Agriculture.
- Yang, J., Lai, X., Wang, Y., Guo, L., Zong, Y., Zhang, D., ... & Li, P. (2024). Nitrification inhibitor shifts the composition of soil microbial communities and increases N utilization potentials in wheat soil under elevated CO2 concentration. Plant and Soil, 1-16.
- Zhang, X., Zhang, J., Li, L., Liu, Y., Zhen, W., & Wang, G. (2024). Interaction Effects of Water and Nitrogen Practices on Wheat Yield, Water and Nitrogen Productivity under Drip Fertigation in Northern China. Agriculture, 14(9), 1496.

Chapitre 5. Les méthodes analytiques pour contrôler les contaminants

5.1. Méthodes d'analyse pour la détection de la teneur en pesticides dans les céréales et les produits céréaliers

Les méthodes d'analyse des pesticides peuvent être classées en quatre groupes : techniques chromatographiques, techniques spectroscopiques, techniques de spectrométrie de masse, techniques d'immuno-essais et électrophorèse capillaire. Les méthodes d'analyse conventionnelles sont la chromatographie en phase gazeuse (GC) et la chromatographie liquide haute performance (HPLC) couplées à divers détecteurs (UV, FD, DAD). Différents types de détecteurs sont utilisés selon la classe de pesticides analysés (ECD pour les composés halogénés, FPD pour les pesticides contenant du soufre et du phosphore, NPD pour les composés contenant de l'azote et du phosphore). Le FID convient à la détection de tous les pesticides.

La spectrométrie de masse (MS) et la spectrométrie de masse en tandem (MS) sont supérieures aux autres détecteurs. Les analyses de résidus de pesticides nécessitent une préparation complexe des échantillons, impliquant des procédures d'extraction et de purification pour garantir une bonne extraction des substances ciblées et éviter la coextraction de composés interférents indésirables. La technique de préparation d'échantillons QuEChERS est largement utilisée pour l'analyse multi résidus dans diverses matrices alimentaires. Cette technique a gagné en popularité grâce à sa simplicité, sa rapidité, sa capacité à extraire un large spectre de pesticides et sa consommation réduite de solvants organiques. Les céréales sont des matrices complexes en raison de la présence de matières grasses et d'une forte proportion de solides. Certaines modifications de la technique QuEChERS sont donc recommandées pour améliorer l'efficacité, la sélectivité et la sensibilité de l'extraction. Outre QuEChERS, les extractions liquide-liquide et en phase solide sont des méthodes d'extraction importantes pour l'analyse des pesticides. QuEChERS est compatible avec la GC et la LC couplées à la MS ou à la MS/MS.

5.2. Méthodes d'analyse pour la détection de la contamination par les métaux lourds dans les céréales et les produits céréaliers.

Les techniques d'analyse les plus fréquemment utilisées dans les laboratoires d'analyse alimentaire pour déterminer la contamination des aliments par des éléments lourds sont : la spectrométrie d'absorption atomique à flamme (FAAS) et la spectrométrie d'absorption atomique à four graphite (GF-AAS). Il existe de nombreuses autres méthodes, telles que la spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES), la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS), la spectrométrie d'absorption atomique à four graphite à source continue haute résolution (HR-CS-GFAAS) ; la chromatographie d'échange d'anions couplée à la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (AEC-ICP-MS) ; la spectrométrie d'émission optique à plasma induit par micro-ondes (MIP-OES) ; les méthodes électrochimiques (potentiométrie, etc.), la spectroscopie de fluorescence atomique (AFS) et la spectroscopie d'absorption des rayons X (XAS). La préparation des échantillons comprend le séchage, le broyage et la décomposition des échantillons par digestion sèche, humide et micro-ondes.

5.3. Méthodes d'analyse pour la détection des composés azotés dans les céréales et les produits céréaliers

La détection et la quantification des composés azotés dans les céréales et les produits à base de céréales sont essentielles pour évaluer la qualité nutritionnelle, notamment la teneur en protéines, ainsi que pour garantir la sécurité alimentaire en surveillant les substances azotées indésirables telles que les nitrates, les nitrites ou les amines biogènes. Plusieurs méthodes d'analyse sont couramment utilisées dans les laboratoires de recherche et industriels pour atteindre ces objectifs, chacune présentant ses propres avantages et limites.

La méthode Kjeldahl

La méthode Kjeldahl est l'une des techniques les plus anciennes et les plus utilisées pour déterminer la teneur en azote total des aliments, y compris les céréales. Son principe consiste à digérer l'échantillon avec de l'acide sulfurique concentré, qui transforme l'azote organique en sulfate d'ammonium. Après digestion, la solution est alcalinisée et l'ammoniac libéré est distillé et quantifié par titrage. L'azote étant un composant essentiel des protéines, cette valeur est ensuite utilisée pour estimer la teneur en protéines à l'aide d'un facteur de conversion spécifique.

La méthode Kjeldahl reste une méthode de référence grâce à sa précision et à sa large applicabilité. Elle est normalisée par des organismes tels que l'AOAC et l'ISO et est couramment utilisée dans les laboratoires de contrôle qualité de l'industrie agroalimentaire.

Méthode de combustion de Dumas (analyse élémentaire)

Une alternative à la méthode Kjeldahl est la méthode de Dumas, qui détermine la teneur en azote total par combustion à haute température. Dans ce procédé, l'échantillon est brûlé dans un environnement riche en oxygène, transformant l'azote en azote moléculaire (N_2), qui est ensuite mesuré à l'aide d'un détecteur de conductivité thermique. Cette méthode est plus rapide et ne nécessite pas d'acides ni de bases fortes, ce qui la rend plus sûre et plus écologique. Cependant, comme la méthode Kjeldahl, elle ne fait pas de distinction entre l'azote protéique et non protéique.

Spectrophotométrie UV-Visible

La spectrophotométrie UV-Visible est fréquemment utilisée pour détecter les composés azotés inorganiques tels que les nitrates et les nitrites dans les échantillons de céréales. L'une des procédures les plus couramment employées est la réaction de Griess, spécifique aux nitrites. Dans cette méthode, les nitrites réagissent avec l'acide sulfanilique et un agent de couplage pour former un colorant azoïque coloré, dont l'intensité peut être mesurée par spectrophotométrie à environ 540 nm.

Pour les nitrates, qui ne réagissent pas directement lors de la réaction de Griess, une étape de réduction est généralement nécessaire pour les convertir en nitrites. Des méthodes d'absorption UV directe peuvent également être utilisées, notamment dans la gamme 220-275 nm. Cette méthode est relativement simple et économique, mais il faut veiller à minimiser les interférences avec d'autres composants de la matrice.

Chromatographie liquide haute performance (HPLC)

La HPLC est une technique puissante qui permet la séparation et la quantification d'un large éventail de composés azotés dans les céréales, notamment les acides aminés libres, les amines biogènes, l'urée et les petits peptides. La détection s'effectue généralement par UV, fluorescence ou spectrométrie de masse, selon les analytes et les réactifs de dérivatisation utilisés.
Par exemple, les acides aminés peuvent être dérivatisés avec de l'o-phtalaldéhyde (OPA) ou du chlorure de dansyle pour améliorer la sensibilité de détection. La HPLC est particulièrement utile pour le profilage nutritionnel et le suivi des processus de fermentation ou d'altération des produits céréaliers.

Chromatographie ionique

La chromatographie ionique (CI) est très efficace pour la détermination des espèces azotées inorganiques telles que les nitrates et les nitrites. Elle est particulièrement utile lorsque des limites de détection très basses sont requises ou pour l'analyse de matrices céréalières complexes. Les systèmes CI peuvent séparer les ions en fonction de leur charge et de leur taille, et les détecter avec une sensibilité et une spécificité élevées, ce qui rend cette méthode adaptée aux tests de conformité réglementaire en matière de sécurité alimentaire.

Chromatographie en phase gazeuse (GC) et GC-Spectrométrie de masse (GC-MS)

La chromatographie en phase gazeuse, souvent couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS), est utilisée pour la détection de composés azotés volatils tels que les amines biogènes. Ces composés peuvent se former lors de l'altération des céréales ou des processus de fermentation et peuvent servir d'indicateurs de la qualité du produit.
Avant l'analyse, les amines sont généralement dérivées afin d'améliorer leur volatilité et leur détection. Cette technique offre une excellente sensibilité et spécificité, mais nécessite une instrumentation et une préparation des échantillons plus avancées que les méthodes spectrophotométriques.

Électrophorèse capillaire (EC)

L'électrophorèse capillaire est une technique émergente d'analyse des composés azotés. Elle offre une haute résolution et nécessite peu d'échantillons et de réactifs. Elle convient à l'analyse des acides aminés, des nitrates et des nitrites. Bien qu'elle ne soit pas encore aussi couramment utilisée que la HPLC ou la chromatographie ionique, l'EC gagne en popularité dans les milieux académiques et analytiques de haute précision grâce à son efficacité et à son profil de chimie verte.

Références

- He, S., Niu, Y., Xing, L., Liang, Z., Song, X., Ding, M., & Huang, W. (2024). Research progress of the detection and analysis methods of heavy metals in plants. Frontiers in Plant Science, 15, 1310328.
- Vasilachi, I. C., Stoleru, V., & Gavrilescu, M. (2023). Analysis of heavy metal impacts on cereal crop growth and development in contaminated soils. *Agriculture*, *13*(10), 1983.

- Balkrishna, A., Kumari, A., Kumar, A., Arya, V., Chauhan, A., Upadhyay, N. K., ... & Kuca, K. (2024). Biosensors for detection of pesticide residue, mycotoxins and heavy metals in fruits and vegetables: A concise review. *Microchemical Journal*, 111292.
- Proshad, R., & Idris, A. M. (2023). Evaluation of heavy metals contamination in cereals, vegetables and fruits with probabilistic health hazard in a highly polluted megacity. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(32), 79525-79550.
- Yutilova, K., Shved, E., Rozantsev, G., & Adamski, A. (2025). Russia–Ukraine war impacts on environment: warfare chemical pollution and recovery prospects. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-18.
- Jomova, K., Alomar, S. Y., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2025). Heavy metals: toxicity and human health effects. *Archives of toxicology*, *99*(1), 153-209.
- Anwar Samsidar, A. S., Shafiquzzaman Siddiquee, S. S., & Sharifudin Md Shaarani, S. M. S. (2018). A review of extraction, analytical and advanced methods for determination of pesticides in environment and foodstuffs.
- Radowan, A. A. A. (2024). Analytical Techniques for Determining Pesticide Residues in Food: A Comprehensive Review. *International Journal of Materials Technology and Innovation*, *4*(1), 42-74.
- Scutarașu, E. C., & Trincă, L. C. (2023). Heavy metals in foods and beverages: Global situation, health risks and reduction methods. *Foods*, *12*(18), 3340.
- Shukla, S., Mbingwa, G., Khanna, S., Dalal, J., Sankhyan, D., Malik, A., & Badhwar, N. (2023). Environment and health hazards due to military metal pollution: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *20*, 100857.
- Prof. Yuriy Dmytruk Podillia State University (PSU) Soil Protection Institute of Ukraine (SPIU) The State of Soil in Ukraine: Features, degradation and impact of war. Presentation_The-State-Soil-Ukraine_22.10.2024.pdf
- Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, *13*(10), 1614.
- Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*, *12*(21), 9002.
- Solokha, M., Pereira, P., Symochko, L., Vynokurova, N., Demyanyuk, O., Sementsova, K., ... & Barcelo, D. (2023). Russian-Ukrainian war impacts on the environment. Evidence from the field on soil properties and remote sensing. *Science of the Total Environment*, *902*, 166122.
- Leal Filho, W., Fedoruk, M., Paulino Pires Eustachio, J. H., Barbir, J., Lisovska, T., Lingos, A., & Baars, C. (2023). How the war in Ukraine affects food security. *Foods*, *12*(21), 3996.
- The importance of Ukraine and the Russian federation for global agricultural markets and the risks associated with the war in Ukraine. Information note. Food and Agriculture Organizations of the Unaided Nationals. 10 june 2022. Update. FAO 2023 Risks associated war Ukraine (no pollutants).pdf
- Sytar, O., & Taran, N. (2022). Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine–a review. *Journal of Central European Agriculture*, *23*(4), 881-887.

- Temkin, A. M., Evans, S., Spyropoulos, D. D., & Naidenko, O. V. (2024). A pilot study of chlormequat in food and urine from adults in the United States from 2017 to 2023. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, *34*(2), 317-321.
- Wolterink, G., & Moretto, A. PIRIMIPHOS-METHYL (ADDENDUM). *Pesticide residues in food—2006*, 355.
- Lagisz, M., Wolff, K., & Port, G. (2010). Time matters: delayed toxicity of pirimiphos-methyl on Tribolium castaneum (Herbst)(Coleoptera: Tenebrionidae) and its effects on efficacy estimation of residual treatments. *Journal of Stored Products Research*, *46*(3), 161-165.
- Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance pirimiphos-methyl; finalised: 10 August 2005. EFSA Scientific Report (2005) 44, 1-53, Conclusion on the peer review of pirimiphos-methyl. http://www.efsa.eu.int
- Division of Toxicology and Human Health Sciences-Glyphosate - ToxFAQs™. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. August 2020. Toxfacts_Glyphosate.pdf
- TOXICOLOGICAL PROFILE FOR CHLORPYRIFOS U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. September 1997.
- ATSDR ToxProfile_Chlorpyrifos.pdf
- GUIDELINES FOR DRINKING-WATER QUALITY: FOURTH EDITION INCORPORATING THE FIRST AND SECOND ADDENDA. 12. CHEMICAL FACT SHEETS. p. 487-488. pirimiphos-methyl-fact-sheet-WHO.pdf
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry ToxFAQs, U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, Public Health Service: CHLORPYRIFOS CAS # 2921-88-2. September 1997. Toxfacts84_Chlorpyrifos.pdf
- Nugent, A., & Thielecke, F. (2020). Dietary intakes of whole grains, health benefits but do contaminants pose a major risk?. *Proceedings of the Nutrition Society*, *79*(OCE2), E436.
- Thielecke, F., & Nugent, A. P. (2018). *Contaminants in grain—A major risk for whole grain safety? Nutrients 10 (9): 1213*.
- Anca Corina Fărcaş (2024). Chapter: Food Safety in Cereal Grains: Contaminants, Legislation, and Mitigation Strategies in Worldwide Megatrends in Food Safety and Food Security.
- DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1007523. Farcas 2024 Chapter.pdf
- Ukrainian wheat crop-2020: quality and safety under the spotlight. Source: APK-Inform. Sep 17, 2020.
- Ukrainian wheat crop-2020: quality and safety under the spotlight

Chapitre 6. Risque sanitaire lié à la contamination des céréales et des produits céréaliers

6.1. Risque sanitaire lié à la contamination des céréales et des produits céréaliers par des pesticides

La consommation de céréales et de produits céréaliers contaminés par des pesticides peut présenter divers risques pour la santé, selon le type et la quantité de pesticides, la durée d'exposition et l'état de santé général de la personne.

Risques potentiels pour la santé

Toxicité aiguë : Certains pesticides peuvent provoquer une intoxication aiguë, se manifestant par des nausées, des vomissements, des diarrhées, des maux de tête, des étourdissements, des convulsions, voire la mort en cas d'exposition à de fortes doses.

Effets à long terme : Une exposition prolongée aux pesticides, même à faibles doses, peut augmenter le risque de maladies chroniques telles que :

Cancer : Certains pesticides sont considérés comme cancérigènes ou peuvent contribuer au développement de cancers, notamment la leucémie, le lymphome non hodgkinien et le cancer du sein.

Maladies neurologiques : L'exposition aux pesticides peut affecter le système nerveux, augmentant le risque de maladie de Parkinson, d'Alzheimer et d'autres maladies neurodégénératives. - Troubles hormonaux : Certains pesticides peuvent perturber le système endocrinien, affectant la fertilité, le développement et la fonction thyroïdienne.

Problèmes respiratoires : L'inhalation ou l'exposition à certains pesticides peut provoquer de l'asthme, des bronchites et d'autres problèmes respiratoires.

Atteintes au système immunitaire : Certaines études suggèrent que les pesticides peuvent affaiblir le système immunitaire, rendant l'organisme plus vulnérable aux infections.

Problèmes de développement chez l'enfant : Les femmes enceintes exposées aux pesticides peuvent avoir des bébés présentant un faible poids à la naissance, des malformations congénitales ou des retards de développement.

Facteurs influençant le risque

Type de pesticide : Différents pesticides ont différents degrés de toxicité et peuvent avoir différents effets sur la santé.

Quantité de pesticide : Plus la quantité de pesticide ingérée est importante, plus le risque pour la santé est élevé.

Durée de l'exposition : Une exposition répétée ou prolongée aux pesticides peut augmenter le risque d'effets à long terme.

État de santé individuel : Les personnes dont le système immunitaire est affaibli, les femmes enceintes, les jeunes enfants et les personnes souffrant de certaines pathologies préexistantes peuvent être plus vulnérables aux effets nocifs des pesticides.

6.2. Risques pour la santé liés aux céréales et produits céréaliers contaminés par des métaux lourds

Les métaux lourds toxiques tels que le cadmium, le mercure, le plomb et l'arsenic peuvent non seulement entrer en compétition avec des minéraux essentiels (par exemple, le calcium, le magnésium et le fer) pour l'absorption cellulaire, mais aussi manifester une affinité pour les constituants cellulaires vitaux, notamment les protéines structurales, les enzymes et les acides nucléiques, perturbant potentiellement leurs fonctions respectives.

La consommation de céréales et produits céréaliers contaminés par des métaux lourds présente de nombreux risques pour la santé, dont la manifestation dépend de plusieurs facteurs, notamment le type et la concentration du métal lourd, la durée d'exposition et l'état physiologique de l'individu. Les métaux lourds sont nocifs, même à faibles concentrations, en raison de leur longue demi-vie biologique, de leur persistance et de leur potentiel d'accumulation dans les organes.

Risques pour la santé liés à la contamination des céréales et produits céréaliers par les métaux lourds
Les céréales et produits céréaliers peuvent accumuler des métaux lourds tels que le plomb (Pb), l'arsenic (As) et le cadmium (Cd) provenant du sol, de l'eau et de l'air contaminés. L'exposition chronique à ces métaux par la consommation alimentaire présente des risques importants pour la santé.

Toxicité aiguë : L'exposition à certains métaux lourds, comme le mercure et l'arsenic, peut déclencher une intoxication aiguë, caractérisée par des symptômes tels que nausées, vomissements, diarrhée, maux de tête, étourdissements, convulsions et, dans les cas extrêmes, la mort.
Effets à long terme : Même une exposition prolongée à de faibles doses de métaux lourds peut augmenter l'incidence de maladies chroniques graves :
Cancer : Certains métaux lourds, comme l'arsenic, le cadmium et le plomb, sont classés comme cancérigènes ou peuvent contribuer au développement de néoplasmes, notamment de la peau, du poumon, de la vessie et du rein.
Maladies neurologiques : L'exposition aux métaux lourds peut affecter le système nerveux et a été impliquée dans l'étiologie de maladies neurodégénératives telles que la maladie de Parkinson et la maladie d'Alzheimer.
Troubles rénaux : Le cadmium et le plomb peuvent endommager la fonction rénale, augmentant le risque d'insuffisance rénale.
Problèmes osseux : Le plomb peut interférer avec le métabolisme du calcium, favorisant l'ostéoporose et les fractures.
Troubles du système cardiovasculaire : Certains métaux lourds peuvent influencer négativement la tension artérielle et le rythme cardiaque, augmentant ainsi le risque de maladies cardiovasculaires.
Troubles du développement chez l'enfant : L'exposition aux métaux lourds pendant la grossesse peut avoir des conséquences néfastes sur le développement du fœtus, notamment un faible poids à la naissance, des malformations congénitales et des retards de développement neurologique.
Des risques sanitaires plus spécifiques (selon l'élément) liés à la contamination par les métaux lourds des céréales et des produits céréaliers sont présentés ci-dessous.

Plomb (Pb)
• Lésions neurologiques – Particulièrement nocif pour les enfants, entraînant des troubles cognitifs, une baisse du QI et des retards de développement.
• Effets cardiovasculaires – Risque accru d'hypertension et de maladies cardiaques.
• Lésions rénales – Une accumulation à long terme peut entraîner un dysfonctionnement rénal.

Arsenic (As)
• Cancérogénicité – Une exposition prolongée à l'arsenic inorganique est associée à des cancers (de la peau, du poumon et de la vessie).
• Affections cutanées – Hyperpigmentation, lésions et kératose.
• Effets neurologiques et cardiovasculaires – Risque accru de déclin cognitif, de diabète et de maladies cardiovasculaires.

Cadmium (Cd)

• Toxicité rénale – Organe cible majeur ; une exposition chronique entraîne une insuffisance rénale.
• Faiblesse osseuse – Provoque une déplétion calcique, entraînant ostéoporose et fractures.
• Cancérogénicité – Classé comme cancérogène pour l'homme, associé au cancer du poumon et de la prostate. Populations vulnérables
• Nourrissons et enfants – Plus sensibles aux lésions neurologiques et aux troubles du développement.
• Femmes enceintes – Risque de passage de métaux lourds à travers le placenta, affectant le développement fœtal.
• Personnes âgées – Risque accru de lésions rénales et de maladies osseuses.

Limites réglementaires et prévention

Des organismes comme l'EFSA, l'OMS et la FDA fixent des limites réglementaires strictes pour contrôler les concentrations de métaux lourds dans les aliments. Les mesures préventives comprennent la surveillance des sols et de l'eau, l'utilisation contrôlée d'engrais et l'utilisation de techniques de transformation pour réduire la contamination des céréales.

Manifestations toxiques

Toxicité aiguë : L'exposition à certains métaux lourds, comme le mercure et l'arsenic, peut déclencher une intoxication aiguë, caractérisée par des symptômes tels que nausées, vomissements, diarrhée, maux de tête, étourdissements, convulsions et, dans les cas extrêmes, la mort.

Effets à long terme : Même une exposition prolongée à de faibles doses de métaux lourds peut augmenter l'incidence de maladies chroniques graves :

Cancer : Certains métaux lourds, dont l'arsenic, le cadmium et le plomb, sont reconnus comme cancérigènes ou impliqués dans le développement de néoplasmes, notamment les carcinomes de la peau, du poumon, de la vessie et du rein.

Dysfonctionnement cardiovasculaire : Certains métaux lourds ont été associés à des effets délétères sur le système cardiovasculaire, notamment des altérations de la pression artérielle et du rythme cardiaque, augmentant ainsi potentiellement le risque de maladie cardiovasculaire.

Maladies neurologiques : L'exposition aux métaux lourds peut affecter le système nerveux et a été impliquée dans l'étiologie de maladies neurodégénératives telles que la maladie de Parkinson et la maladie d'Alzheimer.

Troubles rénaux : Le cadmium et le plomb peuvent endommager la fonction rénale, augmentant le risque d'insuffisance rénale.

Problèmes osseux : Le plomb peut interférer avec le métabolisme du calcium, favorisant l'ostéoporose et les fractures.

Problèmes de développement chez l'enfant : L'exposition aux métaux lourds pendant la grossesse peut entraîner des problèmes de développement, notamment un faible poids à la naissance, des malformations congénitales et des retards de développement neurologique.

Toxicité hépatique : En dérégulant le système antioxydant de l'organisme humain, les métaux lourds provoquent un stress oxydatif hépatique susceptible d'entraîner une inflammation, des modifications

cancérigènes et une insuffisance hépatique. - Effets métaboliques et toxicité systémique sur les organes : En se liant aux protéines des systèmes biologiques et en subissant des réactions redox, les métaux lourds perturbent les mécanismes de contrôle cellulaire et provoquent un dysfonctionnement des mécanismes antioxydants cellulaires, conduisent à la génération d'espèces d'oxydation réactives qui provoquent en outre des dommages à l'ADN et dégradent et inactivent les biomolécules.

Facteurs de risque

Type de métal lourd : Chaque métal lourd possède un profil toxique spécifique, entraînant des effets spécifiques sur la santé.

Concentration en métaux lourds : Plus la quantité de métal lourd ingérée est élevée, plus le risque pour la santé est élevé.

Durée d'exposition : Une exposition répétée ou prolongée aux métaux lourds augmente le risque d'effets à long terme.

État de santé de l'individu : Les personnes dont le système immunitaire est affaibli, les femmes enceintes, les jeunes enfants et les personnes souffrant de certaines pathologies préexistantes sont plus vulnérables aux effets nocifs des métaux lourds.

6.3. Risque sanitaire des céréales et des produits céréaliers contaminés par des composés azotés

La présence de contaminants azotés dans les céréales représente une menace importante pour la santé publique. Ces composés, notamment les nitrates, les nitrites et les amines, peuvent provenir de diverses sources anthropiques telles que les engrais, les pesticides et les rejets d'eaux usées.

Mécanismes de contamination

La contamination des céréales par des composés azotés peut survenir tout au long de la chaîne de production et de transformation :

● **Avant la récolte :** L'application excessive d'engrais azotés peut entraîner des concentrations élevées de nitrates dans la matrice du sol, entraînant par la suite une absorption et une accumulation accrues dans les tissus végétaux.

● **Après la récolte :** Des conditions de stockage sous-optimales peuvent favoriser la croissance de micro-organismes capables de convertir les nitrates en nitrites et en amines.

● **Transformation :** Certaines techniques de transformation, notamment la torréfaction et la fermentation, peuvent induire la formation de composés aminés.

Effets néfastes sur la santé

La consommation de céréales contaminées par des composés azotés peut entraîner un éventail d'effets néfastes sur la santé, dont la gravité dépend à la fois de la concentration du contaminant et de la durée d'exposition.

Les principaux risques pour la santé comprennent :

● **La méthémoglobinémie :** Les nitrites peuvent oxyder l'hémoglobine en méthémoglobine, une forme de protéine non porteuse d'oxygène. Cela peut altérer l'apport d'oxygène aux tissus, entraînant cyanose, fatigue et dyspnée.

● **Cancérogénicité :** Certaines amines peuvent réagir avec les nitrites présents dans l'environnement acide de l'estomac pour produire des nitrosamines, des composés reconnus pour leur potentiel cancérigène.
● **Toxicité systémique :** L'exposition aux composés azotés a été impliquée dans le développement de diverses autres complications de santé, notamment des troubles neurologiques, cardiovasculaires et de la reproduction.

Stratégies d'atténuation

Une atténuation efficace de la contamination des céréales par les composés azotés nécessite la mise en œuvre de mesures de prévention et de contrôle à toutes les étapes de la production et de la transformation :
● **Application optimisée des engrais :** L'utilisation judicieuse d'engrais azotés, adaptés aux besoins spécifiques des cultures, est essentielle pour minimiser l'accumulation de nitrates dans le sol et leur absorption ultérieure par les plantes.
● **Pratiques de stockage contrôlées :** Il est crucial de maintenir des conditions de stockage appropriées qui inhibent la prolifération microbienne et la formation de sous-produits azotés.
● **Assurance qualité complète :** une surveillance régulière des niveaux de composés azotés dans les céréales et les produits dérivés des céréales au moyen de tests analytiques est nécessaire pour garantir la sécurité des consommateurs.

Références

- Alavanja, M. C. R., Bonner, M. R., & Beane Freeman, L. E. (2012). Pesticide exposure and cancer risk: An update from the Agricultural Health Study. *Environmental Health Perspectives*, *120*(6), 879-887.
- Amarloei, A., Nourmoradi, H., Nazmara, S., Heidari, M., & Mohammadi-Moghadam, F. (2024). Toxic heavy metals of agricultural products in developing countries and its human health risk assessment: A study from Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(1), 1-18.
- Amiard, J., Amiardtriquet, C., Barka, S., Pellerin, J., Rainbow, P., 2006. Metallothioneins in aquatic invertebrates: Their role in metal detoxification and their use as biomarkers. Aquat. Toxicol. 76, 160–202.
- Arora, M., Mittleman, M. A., & Sanyal, S. (2024). Heavy metal exposure and cardiovascular disease. *Circulation Research*, *134*(8), 1162-1175.
- Balali-Mood, M., Naseri, K., & Afshari, R. (2021). Toxic effects of heavy metals. *Journal of Medical Toxicology*, *17*(1), 1-28.
- Barman, S. C., Kisku, G. C., & Singh, R. (2024). Heavy metal contamination and its impact on the food chain: Exposure, bioaccumulation, and risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, *30*(3), 2438726.
- Corsini, E., Luster, M. I., & Kimura, J. (2015). A comprehensive review of pesticides and the immune dysregulation: Mechanisms, evidence and consequences. *Toxicology Mechanisms and Methods*, *25*(4), 258-278.
- Goyer, R., Golub, M., Choudhury, H., Hughes, M., Kenyon, E., Stifelman, M., 2004. U.S. Environmental Protection Agency, Issue paper on the human health effects of metals. https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-11/documents/human_health_effects.pdf

- Grandjean, P., & Landrigan, P. J. (2014). Neurobehavioural effects of developmental toxicity. *The Lancet Neurology*, *13*(3), 330-338.
- Henriques, B., Rocha, L.S., Lopes, C.B., Figueira, P., Duarte, A.C., Vale, C., Pardal, M.A., Pereira, E., 2017. A macroalgae-based biotechnology for water remediation: Simultaneous removal of Cd, Pb and Hg by living Ulva lactuca. J Environ Manage. 191, 275-289.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Annu, N., Kumar, A., & Bhasker, R. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Chemosphere*, *108*, 105-115.
- Jurewicz, J., Hanke, W., & Zielinska, A. (2019). Pesticides: Environmental stressors implicated in the development of central nervous system disorders and neurodegeneration. *Toxics*, *7*(2), 31.
- Kim, Y. H., Kim, K. H., & Kim, Y. S. (2017). Immunotoxicity of pesticides: From mechanisms to adverse health effects. *Journal of Clinical Toxicology*, *7*(1), 1000331.
- Kumar, K., & Ram, M. (2014). Acute pesticide poisoning: A proposed classification tool. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, Critical Reviews*, *17*(1), 22-38.
- Mnif, W., Hassine, A. I. H., Bouaziz, A., Bartegi, A., Thomas, O., & Mosbah, H. (2011). Effect of endocrine disruptor pesticides: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *8*(6), 2265-2283.
- Mostafalou, S., & Abdollahi, B. (2013). Cancer health effects of pesticides: Systematic review. *Iranian Journal of Toxicology*, *7*(2), 527-544.
- Mostafalou, S., & Abdollahi, M. (2013). Pesticides and neurodegenerative diseases: An update. *Neurotoxicology*, *34*, 242-253.
- Rauh, V. A., Arunachalam, S., & Horton, M. K. (2020). Prenatal and childhood pesticide exposure and neurodevelopmental outcomes: A review. *Environmental Health Perspectives*, *128*(7), 075001.
- Rahman, M. A., Uddin, M. J., & Rahman, M. M. (2021). Heavy metal contamination and associated health risk in the most consumed fruits and vegetables from agricultural lands of Bangladesh. *Exposure and Health*, *13*(2), 263-278.
- Roohani, N., Hurrell, R., Kelishadi, R., Schulin, R., 2013. Zinc and its importance for human health: An integrative review. J. Res. Med. Sci. Off. J. Isfahan Univ. Med. Sci. 18, 144–157.
- Salameh, P., Baldi, I., & El Hajj, T. (2018). Environmental exposure to pesticides and respiratory health. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, *24*(1), 47-53.
- Sarwar, M. F., Sarwar, M., Sarwar, M. H., & Khalid, M. T. (2016). Environmental and health effects of pesticide residues. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(16), 16040-16056.
- Sharma, A., Kumar, A., & Singh, R. (2024). A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term human health impacts. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(1), 1-18