



HAL
open science

Pesticides in food: How to limit consumer exposure

Laurence Gamet-Payrastre, Anne Fougerat

► **To cite this version:**

Laurence Gamet-Payrastre, Anne Fougerat. Pesticides in food: How to limit consumer exposure. Cahiers de Nutrition et de Diététique, In press, 11 p. 10.1016/j.cnd.2024.09.001 . hal-04725520

HAL Id: hal-04725520

<https://hal.science/hal-04725520v1>

Submitted on 8 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

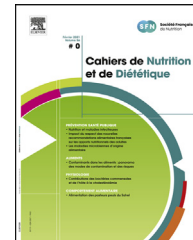


Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



TOXICOLOGIE

Pesticides dans l'alimentation : comment limiter l'exposition des consommateurs

Pesticides in food: How to limit consumer exposure

Laurence Gamet-Payrastré*, Anne Fougerat

Toxalim (Research Centre in Food Toxicology), université de Toulouse, INRAE, ENVT, INP-Purpan, UT3, Toulouse, France

Received 16 May 2024; accepted 1st September 2024

MOTS CLÉS

Pesticides;
Alimentation;
Biodisponibilité;
Exposition humaine;
Santé

Résumé Les pesticides utilisés en agriculture conventionnelle sont retrouvés dans les fruits et légumes à des doses non toxiques mais en mélange. La répartition des pesticides dans ces aliments dépend de leur structure chimique, de leur solubilité dans l'eau ou les lipides, de leur action (systémique ou de contact) et du type de végétaux. Les produits transformés à base de fruits contiennent aussi des pesticides, notamment les sodas à base de jus de fruits. Les pesticides sont des composés biologiquement actifs qui peuvent exercer des impacts sur des cibles autres que celles pour lesquelles ils ont été conçus. Les études épidémiologiques montrent une forte présomption de lien entre l'exposition professionnelle aux pesticides et le développement de certaines pathologies. Chez le consommateur, le risque de développer un diabète de type 2 ou un cancer du sein est corrélé avec un profil d'exposition à certains pesticides. Par ailleurs, des études précliniques indiquent que l'exposition alimentaire à des cocktails de pesticides, chacun présent à des doses non toxiques, conduit au développement de perturbations métaboliques. Ainsi, il apparaît essentiel de réduire l'exposition des consommateurs aux pesticides. Pour cela, différentes techniques accessibles à tous telles que l'épluchage, le trempage dans l'eau claire ou acidifiée, les hautes températures peuvent réduire les niveaux de pesticides dans les fruits et légumes. Cependant, la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique reste le moyen le plus efficace pour réduire l'exposition des consommateurs aux pesticides.

© 2024 The Authors. Published by Elsevier Masson SAS on behalf of Société française de nutrition. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

* Auteur correspondant.

E-mail address: laurence.payrastr@inrae.fr (L. Gamet-Payrastré).

<https://doi.org/10.1016/j.cnd.2024.09.001>

0007-9960/© 2024 Les Auteurs. Publié par Elsevier Masson SAS au nom de Société française de nutrition. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Please cite this article as: L. Gamet-Payrastré and A. Fougerat, Pesticides dans l'alimentation : comment limiter l'exposition des consommateurs, Cahiers de nutrition et de diététique, <https://doi.org/10.1016/j.cnd.2024.09.001>

KEYWORDS

Pesticides;
Food;
Biodisponibilité;
Human exposure;
Health

Summary Pesticides used in conventional agriculture are found in fruits and vegetables at non-toxic doses but in mixture. Their distribution in fruits and vegetables depends on their chemical structure, their solubility in water or lipids, their action (systemic or contact) and the type of plant. Processed fruit products also contain pesticides, especially fruit-juice-based soft drinks. Pesticides are biologically active compounds which can affect targets other than those for which they were designed. Epidemiological studies show a strong presumption of a link between occupational exposure to pesticides and the development of several pathologies. In consumers, the risk of developing type 2 diabetes is correlated with a profile of exposure to certain pesticides. In addition, preclinical studies have shown that dietary exposure to pesticide cocktails, each present at non-toxic doses, induces the development of metabolic disorders. It is therefore essential to reduce pesticide exposure. Various techniques, such as peeling, soaking in clear or acidified water, and high temperatures, can reduce pesticide levels in fruits and vegetables. However, the consumption of organically grown food remains the most reliable way of reducing consumer exposure to pesticides.

© 2024 The Authors. Published by Elsevier Masson SAS on behalf of Société française de nutrition. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Introduction

Les pesticides sont destinés à protéger les végétaux ou les produits végétaux contre les organismes nuisibles ou à prévenir de leurs actions, assurer la conservation des produits végétaux, détruire les adventices et freiner ou prévenir une croissance indésirable des végétaux. Les pesticides sont classés selon 4 réglementations : (i) celle des produits phytosanitaires utilisés pour l'agriculture dont la grande majorité dépend du règlement européen ; (ii) celle des biocides destinés aux organismes nuisibles (rodenticides, nématicides, molluscicides) ; (iii) celle des antiparasitaires à usage vétérinaire ; (iv) et des antiparasitaires à usage humain (anti-poux). Les produits pesticides commercialisés sont des formulations, combinant la substance active avec un adjuvant dont la fonction est d'améliorer l'efficacité du pesticide. Il existe de nombreux adjuvants incluant par exemple, des solvants, des dispersants, des émulsifiants, des surfactants et des stabilisateurs.

Les pesticides sont définis selon le règlement (CE) No. 1107/2009 européen. Chaque substance active est soumise à une demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM) (<https://agriculture.gouv.fr/procedure-de-mise-sur-le-marche-des-produits-phytopharmaceutiques-experimentation-evaluation>). Les AMM sont délivrées après évaluation du risque, sur la base d'un dossier déposé par le demandeur (futur titulaire de l'AMM) et évalué par les agences de sécurité sanitaires européennes ou nationales. L'analyse du risque concerne ceux relatifs à la santé humaine, animale et pour l'environnement, et comporte les résultats des études toxicologiques et écotoxicologiques. L'évaluation du risque pour la santé chez l'être humain permet d'établir des valeurs toxicologiques de référence (VTR), valeurs regroupant tous les types d'indice toxicologiques (valeurs repères) permettant de qualifier ou quantifier un risque pour la santé humaine lié à l'exposition à un pesticide individuellement (<https://anses.fr>). La dose journalière admissible (DJA : quantité maximale de pesticides par kilo de poids corporel et par jour qui n'induit pas d'effet

sur la santé) ou la limite maximale de résidus (LMR : quantité maximale de résidus présente par kilo de végétal qui n'induit pas d'effet sur la santé) sont des VTR. Plusieurs instances peuvent construire des VTRs : au niveau mondial, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ; au niveau européen, l'European Food Safety Agency (EFSA) ; en France, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) ; aux États-Unis, l'Environmental Protection Agency (EPA). La DJA est établie pour une substance active de pesticide sur la base d'études de toxicité. Cependant, les denrées traitées par un pesticide peuvent également contenir un ou plusieurs métabolites de pesticides qui ne sont pas pris en compte dans le calcul de la DJA et dont le risque pour la santé doit être évalué. Ces métabolites peuvent être spécifiques aux plantes, aux microorganismes du sol et/ou aux animaux d'élevage et ne pas être présents chez les animaux utilisés dans les études de toxicité. Par conséquent, il n'est pas toujours possible d'évaluer la sécurité sanitaire des métabolites présents dans les denrées et il n'y a pas de lien direct entre la DJA pour une substance active et les propriétés de ses métabolites [1]. De plus, les valeurs toxicologiques de référence sont déterminées pour les pesticides seuls et la question de leur pertinence dans le cas d'exposition à des mélanges de ces composés et aux autres composants de la formulation reste posée.

Présence de pesticides dans l'alimentation

En vertu de la législation de l'Union européenne (article 32 du règlement [CE] n° 396/2005 du Parlement Européen et du Conseil), l'EFSA fournit un rapport annuel évaluant les niveaux de résidus de pesticides dans les denrées alimentaires sur le marché européen. En 2021, les États membres de l'UE ont analysé un total de 87 863 échantillons en vue de détecter des résidus de pesticides dans les produits alimentaires couverts par le règlement (CE) n° 396/2005 (échantillons importés, échantillons nationaux). Selon le

rapport publié par l'EFSA en 2023, sur les 87 863 échantillons totaux analysés, seuls 10,1 % concernaient des aliments transformés (comme par exemple les jus de fruits, farine, raisins de table sous forme de raisins secs, raisins de cuve sous forme de vin rouge, graines de cumin sous forme d'herbes séchées, feuilles de vigne et espèces similaires sous forme de légumes salés, poudre de paprika et riz blanc). Sur les 87 863 échantillons analysés, 44,3 % contenaient un ou plusieurs pesticides à des concentrations quantifiables. La présence de résidus multiples a été rapportée dans 26,4 % des échantillons. La fréquence la plus élevée de résidus multiples dans les produits non transformés a été observée pour les pommes, les raisins de table, les fraises, les bananes, les pamplemousses, les oranges, les poires, les pêches, les poivrons doux, les piments et les fruits à coque. Parmi les échantillons de produits alimentaires transformés, les raisins de cuve, raisins secs, feuilles de céleri séchées, marjolaine, feuilles de vigne et espèces similaires (salées et en conserve) présentaient une fréquence élevée de résidus de pesticides. L'analyse de 1035 échantillons de miel montre que 86,4 % des échantillons ne présentaient pas de niveau quantifiable de résidus (quantités inférieures à la limite de quantification) et que 11,5 % des échantillons contenaient des résidus de pesticides dans les limites autorisées (au niveau ou au-dessus de la limite de quantification, mais au-dessous ou au niveau de la LMR). Au total, 28 pesticides différents ont été trouvés. Les pesticides les plus fréquemment retrouvés dans le miel sont 2 insecticides néonicotinoïdes i.e. le thiaclopride et l'acétamipride. Une diminution de la présence de thiaclopride est notée par rapport aux analyses précédentes en raison de l'arrêt de son utilisation au niveau de l'UE.

Répartition des pesticides dans les fruits et légumes et dans les produits transformés

Biodisponibilité des pesticides dans les fruits : quelques généralités

Les pesticides peuvent être incorporés dans les fruits et légumes au cours des différentes phases de production. Certains pesticides sont absorbés du sol par les racines de l'arbre, puis concentrés dans le fruit. Certains pesticides sont utilisés avant la floraison, d'autres au cours de la croissance et d'autres encore après la récolte des fruits. Les pesticides, s'ils sont appliqués pendant la période de formation des fruits, peuvent également être directement absorbés par la peau [2–4]. Par conséquent, la répartition des pesticides dans un même fruit peut être différente [5]. Les substances actives et leurs métabolites n'ont pas tous la même persistance sur les cultures, dans les différents compartiments de l'environnement (sol, air, eau) ni dans les aliments. Les facteurs physiques et chimiques tels que la lumière, la température, le pH, l'humidité et les facteurs de croissance des plantes jouent un rôle important dans la dégradation des résidus de pesticides [3]. La biodisponibilité des pesticides dans les aliments et les différents composants des fruits et légumes est aussi dépendante de leurs caractéristiques moléculaires, en particulier leur hydrophobie,

représentée par le logarithme du rapport des concentrations à l'équilibre de la substance dans du 1-octanol saturé avec de l'eau, mais aussi de la quantité de phase lipidique cingérée [6]. Par exemple l'herbicide glyphosate est soluble dans l'eau, alors que l'acétamipride, un insecticide néonicotinoïde, est très peu soluble dans l'eau, ce qui influera son élimination par lavage à l'eau (cf. la section « Le lavage »).

De plus, certains pesticides sont systémiques ; c'est-à-dire distribués dans l'ensemble de l'organisme cible sans perte d'efficacité (<https://www.efsa.europa.eu/fr/glossary>) ; alors que d'autres resteront à l'extérieur du végétal (les pesticides de contact). Ces derniers sont éliminés facilement en ce qui concerne les fruits à écorce non comestible i.e. agrumes, banane, melon, pastèque, kiwi, ananas ou autres fruits similaires. Cependant, dans les fruits et légumes tels que la pomme ou la tomate par exemple, il faudra éliminer la peau afin de réduire les résidus de pesticides.

Quelques exemples de la répartition des pesticides dans certains aliments

La pomme

Des tests effectués dans un verger situé à Pékin montrent que les niveaux de résidus de pesticides dans la peau et le cœur des pommes étaient plus élevés que dans la chair des pommes. Après épluchage et évidage, les résidus de pesticides ont été réduits de manière significative dans la partie comestible de la pomme à l'exception de la cyperméthrine. Lors de la préparation du jus de fruits, les pesticides tels que les insecticides chlorpyrifos et cyperméthrine (appartenant respectivement à la famille des organophosphorés et pyréthrinoides) et le fongicide tébuconazole (famille des triazoles) étaient concentrés dans le marc de pomme, alors que l'insecticide néonicotinoïde acétamipride était surtout présent dans le jus de pomme. Cette répartition différentielle des pesticides est due à une hydrophobicité différente entre le jus et le marc de pomme. Dans le jus de pomme les taux de cyperméthrine ont été réduits de 81 à 84 %, et les taux de chlorpyrifos, de tébuconazole, d'acétamipride et de carbendazime de 15 à 36 % [7]. Une autre étude dédiée à l'analyse de la distribution de l'acaricide, cyflumetofen, dans la pomme montre que 50 % de ce composé était retrouvé dans la peau et 22 % dans le marc de pomme [8].

La banane

L'étude par spectrométrie de masse de la répartition de 3 pesticides systémiques de famille chimique différente (propamocarbe, imidaclopride et pyraclostrobine) et d'un pesticide de contact i.e. le thirame, dans les bananes fraîches montre une pénétration puis une migration au fil du temps des pesticides systémiques, vers le noyau après 6 heures. Le taux de transport des pesticides systémiques augmente avec la diminution de leur coefficient de partage octanol-eau et de leur masse moléculaire relative. De plus, ils migrent plus rapidement avec l'augmentation de la maturité des bananes. Le thirame, un fongicide non systémique, n'a pas pénétré à l'intérieur des bananes et est resté uniquement dans la peau [9].

Les agrumes

L'analyse des agrumes collectés en Sicile montre des différences significatives de la répartition de plusieurs fongicides systémiques (imazalil, carbendazime, fenhexamide) entre les échantillons d'orange, de citron et de mandarine. Dans le citron, 58 % de l'imazalil passe de la peau à la partie blanche intérieure en contact avec la pulpe (albédo) et 6 % dans la pulpe. Dans le cas de la mandarine, seul 1,6 % de l'imazalil passe de la peau à la pulpe. Les niveaux de carbendazime dans les mandarines présentent des différences significatives et seulement 16 % passent de la peau à la pulpe. Dans les échantillons de citron, 43 % du fenhexamide est passé de la peau à l'albédo, et 18 % de l'albédo à la pulpe. Les résultats indiquent une faible pénétration de fongicides dans la pulpe probablement due aux caractéristiques physico-chimiques des composés étudiés et de la peau des échantillons analysés [4].

Dans une étude réalisée sur des pomelos provenant de vergers chinois, les échantillons de pulpe, de feuilles et de sol contenaient respectivement, 27, 22 et 18 types de pesticides. L'analyse de la distribution spatiale de la concentration totale de pesticides dans les parties du pomelo montre une présence prépondérante de l'ensemble des pesticides dans l'épicarpe (216 ng/g). Mais ces composés sont aussi retrouvés, bien que dans une moindre mesure, dans le mésocarpe, l'endocarpe, la graine, et la pulpe (9,50 ng/g ; 4,40 ng/g ; 3,80 ng/g ; 1,10 ng/g respectivement). Par ailleurs, cette étude montre aussi que les pesticides retrouvés dans la pulpe provenaient d'une translocation depuis l'épicarpe pour les pesticides non systémiques et d'un transfert depuis la terre arable et/ou le sol profond pour les pesticides systémiques [10].

Le blé

Dans une étude récente réalisée en Chine, 15 graines de blé (variété Jimai 20 contenant des taux élevés de gluten) ont été placées dans un milieu de culture contenant 0,5 mg/L ou 5 mg/L d'imidaclopride, un insecticide néonicotinoïde systémique. La teneur en imidaclopride des racines et des feuilles de blé a été déterminée après 1, 2 et 3 jours d'hydroculture afin d'étudier sa migration et sa distribution dans le blé. Les résultats ont montré que cet insecticide était présent à la fois dans les racines et les feuilles du blé, et que sa teneur dans les racines était plus élevée que dans les feuilles. En outre, la concentration d'imidaclopride dans le blé augmentait avec le temps d'exposition [11].

Les produits transformés

La teneur en pesticides dans les jus de fruits dépend du coefficient de partage des pesticides entre la peau et le jus (logP) : les résidus lipophiles sont moins transférés et une quantité importante reste dans la peau [3]. Une étude réalisée en Turquie montre que, au cours de la transformation des oranges en jus de fruits, les taux de pesticides faiblement solubles dans l'eau (abamectine et étoxazole) diminuent de façon importante, alors que la majeure partie de la concentration de résidus des pesticides plus solubles (thiophanate-méthyle et imazalil) passe dans le jus [12].

Dans une étude récente, les concentrations en pesticides ont été déterminées dans 200 échantillons de boissons

non alcoolisées aromatisées aux agrumes, collectés dans le monde entier au cours de la période 2017–2019 [13]. Il s'agissait de canettes et de bouteilles de différentes marques issues de 67 pays des cinq continents peuplés (Amérique, Afrique, Asie, Europe et Océanie). Parmi ces échantillons, 80 % correspondaient à des boissons non alcoolisées à base de fruits, dont les pourcentages de jus de fruits variaient de 0,3 % à 20 % ; les 20 % d'échantillons restants ne contenaient pas de jus dans leur composition. Les résultats de cette étude montrent que 40 des 88 pesticides recherchés ont été quantifiés dans les 200 échantillons analysés et 85 % des échantillons contenaient plus de 4 pesticides. Le pourcentage de jus de fruits dans les sodas semble être un facteur important dans l'augmentation de la concentration et du nombre de pesticides dans ces boissons. En effet, dans les processus d'élaboration, le fruit entier est utilisé, et de nombreux pesticides sont souvent concentrés dans la peau. En revanche, dans les échantillons ne contenant pas de jus, jusqu'à 14 pesticides ont été trouvés. Ces exemples révèlent que les résidus de pesticides dans les boissons non alcoolisées ne proviennent pas seulement du jus, mais également de la qualité de l'eau.

Dans une étude moins récente, l'analyse de 100 pesticides avait été réalisée sur 102 échantillons de boissons non alcoolisées à base de fruits de différentes marques, et collectés dans 15 pays [14]. Les pesticides détectés (carbendazime, thiabendazole, imazalil et son principal métabolite, prochloraz et son principal métabolite, malathion et iprodione) sont principalement ceux qui sont appliqués sur les cultures aux derniers stades de la production (traitement post-récolte).

Avant le processus de vinification et dès la récolte, les raisins sont pressés avec la peau. Les pesticides de surface seront donc susceptibles de passer dans le jus de raisin en amont de la préparation du vin. Dans des échantillons de vins rouges de différentes origines (les îles Canaries, la péninsule ibérique et le Cap-Vert), 31 pesticides (principalement des fongicides et quelques insecticides) ont été détectés et quantifiés. Les profils étaient variables selon les régions [15]. Après la fermentation, les niveaux de résidus dans le vin peuvent être inférieurs à ceux retrouvés dans le moût à l'exception des fongicides systémiques comme l'azoxystrobine, le diméthoate et le pyriméthanil que l'on trouvera dans le vin à la même concentration que dans le raisin. Par contre le fongicide fludioxonil, qui n'est pourtant pas systémique, n'est pas retrouvé dans les vins préparés avec la peau des raisins mais dans les vins préparés sans la peau et qui contient la moitié des quantités retrouvées dans le moût initial [16]. D'autres facteurs peuvent contribuer à la diminution des taux de certains pesticides dans le vin, comme leur hydrophobicité et leur coefficient de partage solide–liquide qui orienteront leur répartition plutôt dans la lie et le marc [17]. Le charbon utilisé pour clarifier le vin améliore l'élimination des résidus de pesticides mais son efficacité diminue à mesure que la solubilité du pesticide dans l'eau augmente.

En conclusion, l'utilisation de pesticides systémiques et de contact conduit à la contamination des différents constituants des fruits et légumes (peau, chair/pulpe/marc) ainsi que des boissons à base de fruits. Les niveaux de pesticides retrouvés dans les différents compartiments sont variables selon le pesticide recherché et l'aliment analysé.

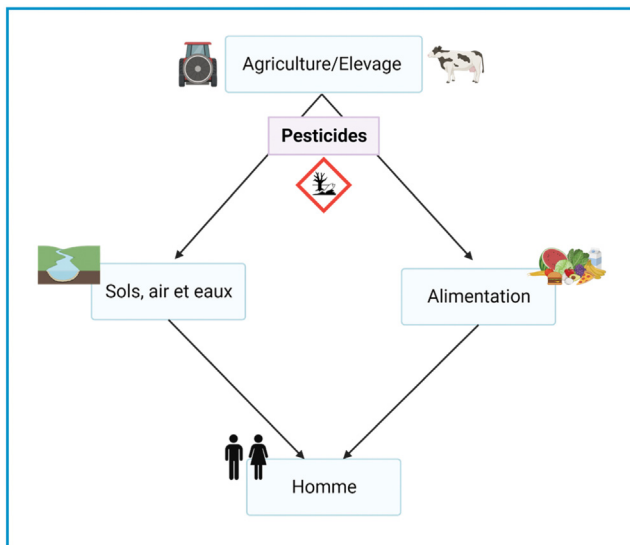


Figure 1. L'utilisation des pesticides en agriculture conduit à l'omniprésence des pesticides dans les différents compartiments de l'environnement et dans l'alimentation et à l'exposition de la population générale.

Le coefficient de partage octanol-eau de chaque composé qui détermine leur solubilité dans les solutions aqueuses, peut permettre d'évaluer leur répartition dans les fruits entiers et les produits transformés à base de fruits.

Exposition des consommateurs et risque pour la santé

L'omniprésence des pesticides dans les différents compartiments de l'environnement et dans l'alimentation conduit à l'exposition de la population générale (Fig. 1).

Les pesticides sont des composés biologiquement actifs qui peuvent affecter des cibles cellulaires autre que celles pour lesquelles ils ont été conçus. En effet, individuellement, dans les cellules de mammifères, les pesticides peuvent impacter l'activité des mitochondries, induire un stress oxydant, interagir avec des récepteurs nucléaires qui régulent par exemple le métabolisme des xénobiotiques, l'homéostasie métabolique ou encore la fonction endocrine (récepteur aux œstrogènes, aux androgènes, thyroïdiens), perturber les voies de signalisation impliquées dans le contrôle de la prolifération cellulaire et de la survie, l'activité ou la composition du microbiote intestinal. Les études expérimentales montrent que les cibles et les mécanismes d'action de certains pesticides sont en lien avec ceux impliqués dans le développement de certaines pathologies. L'impact des pesticides sur la santé a été largement décrit lors de deux expertises collectives nationales [18,19]. La plus récente confirme la présomption forte d'un lien entre l'exposition aux pesticides et six pathologies : lymphomes non hodgkiniens (LNH), myélome multiple, cancer de la prostate, maladie de Parkinson, troubles cognitifs, bronchopneumopathie chronique obstructive et bronchite chronique. Les études épidémiologiques sur les cancers de l'enfant permettent de conclure à une présomption forte de lien entre l'exposition aux pesticides de la mère pendant

la grossesse (exposition professionnelle ou par utilisation domestique) ou chez l'enfant et le risque de certains cancers, en particulier les leucémies et les tumeurs du système nerveux central. Certaines substances actives semblent en lien avec ces pathologies [19]. Par ailleurs, en mélange, les pesticides peuvent conduire à des effets supérieurs à ceux observés lorsqu'ils sont présents seuls. Une étude récente réalisée dans la cohorte de consommateurs français NutriNet-Santé montre que le risque de développer un diabète de type 2 est corrélé avec un profil d'exposition à un cocktail de pesticides [20]. La base des interactions des pesticides dans un mélange est complexe et implique un réseau de cibles et de mécanismes à l'échelle cellulaire et à l'échelle de l'organisme. À l'échelle cellulaire, des pesticides ayant des mécanismes d'action différents conduisant au même effet ou modifiant la biodisponibilité et donc la toxicité des autres composés du mélange en agissant sur les voies de biotransformation, peuvent exercer des effets synergiques lorsqu'ils sont en mélange. L'impact de pesticides sur des organes distincts (par exemple sur le foie, le pancréas, le tissu adipeux, et le microbiote) dont le dysfonctionnement est observé pour une même pathologie (comme les maladies métaboliques), peut conduire s'ils sont en cocktail à des effets supérieurs à ceux observés en présence de pesticides seuls. De plus, l'effet d'un même cocktail de pesticides peut exercer des impacts différents selon l'organe ou la fonction physiologique mais aussi selon la période, la durée et la chronicité de l'exposition [21–24]. Il n'est donc pas toujours possible de prédire les effets de pesticides en mélange à partir des effets de chaque pesticide individuellement.

Comment réduire les expositions des consommateurs aux pesticides

Les cultures traitées avec des pesticides contiennent des quantités non prévisibles de ces produits chimiques (Fig. 2). Le délai après l'application des pesticides est un paramètre important car certains composés peuvent avoir tendance à pénétrer les couches intérieures des fruits et légumes [3]. Néanmoins, différentes techniques de décontamination des fruits et légumes sont accessibles aux consommateurs et permettent de réduire au moins en partie la présence de certains pesticides. Les étapes préparatoires telles que l'épluchage et l'émondage éliminent les pesticides présents dans les cuticules de fruits et légumes [25]. Un article paru en 2020 fait le point sur le devenir des pesticides après le lavage, la transformation et le stockage des denrées [3]. Les données présentées dans la section ci-dessous (« Les techniques de réduction des pesticides ») sont extraites de cette revue.

Les techniques de réduction des niveaux de pesticides dans les aliments issus de l'agriculture conventionnelle

Le lavage

Le processus de lavage expérimenté dans les études et décrit dans ce document correspond à un trempage (immersion) des fruits ou légumes. Il sera efficace sur les composés

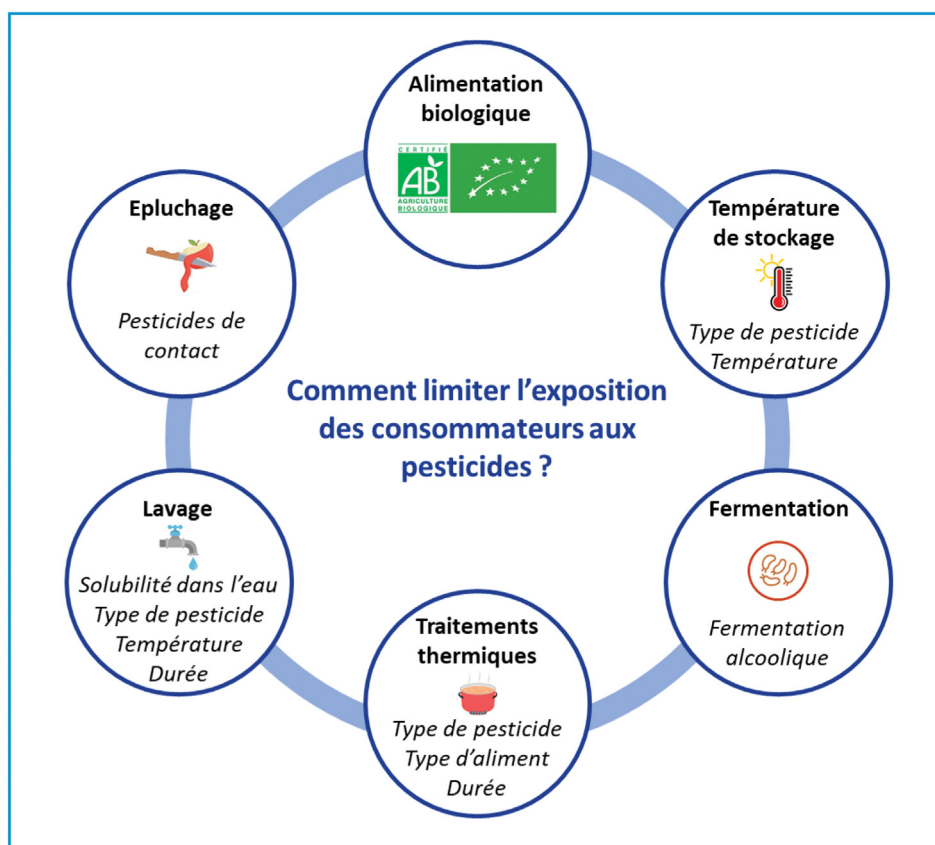


Figure 2. Diverses techniques accessibles aux consommateurs permettent de réduire au moins en partie les niveaux de pesticides dans les fruits et légumes. L'épluchage et le lavage sont efficaces pour éliminer les pesticides de contact. Le lavage à l'eau sera d'autant plus efficace que sa durée est prolongée. L'ajout de citron ou de vinaigre dans l'eau de rinçage permettra un meilleur impact. Les températures élevées, telles que celles utilisées pour la préparation de conserve ou de confiture, contribuent à une élimination efficace des niveaux de pesticides. Les effets du séchage restent incertains. L'efficacité de ces techniques de décontamination dépend de la nature chimique des composés et de leur hydrosolubilité ; leur pertinence n'est donc pas valable pour tous les pesticides.

présents en surface des végétaux. Plusieurs facteurs influencent l'élimination des résidus de pesticides par le trempage tels que l'emplacement du résidu dans l'aliment, la durée, la solubilité du pesticide dans l'eau, la température [5]. Le lavage à l'eau peut réduire les taux de certains pesticides selon leur nature chimique et selon s'ils sont systémiques ou non. Dans une étude publiée en 2012, les auteurs ont examiné les changements des teneurs de quatre fongicides différents (boscalid, mancozeb, iprodione et propamocarb) et d'un insecticide (deltaméthrine) au cours du lavage d'épinards par immersion dans de l'eau à 15°C à raison de 10 L d'eau pour 500 g de végétal pendant 2 ou 3 minutes [26]. Les résultats montrent que le lavage a permis de réduire de 11 à 43 % les concentrations de tous les pesticides, à l'exception de la deltaméthrine qui est très peu soluble dans l'eau. Bien que le propamocarbe ait une très grande solubilité dans l'eau, il n'est réduit que de 11 % en raison de son action systémique. Les autres pesticides ont une action de contact et restent donc à la surface de la feuille, ce qui facilite leur élimination par l'eau. Le pesticide le mieux éliminé est l'iprodione. Les quantités d'insecticides organophosphorés après un lavage à l'eau des épinards diminuent de 45 %. Dans la tomate, les résidus de méthomyl (insecticide carbamate) ont été beaucoup moins éliminés que les résidus d'acétamipride (insecticide néonicotinoïde)

après lavage car le méthomyl est un pesticide systémique qui peut former des liaisons avec les composants alimentaires [27]. Dans les pommes, les diminutions de teneurs les plus importantes consécutives au lavage concernaient l'acétamipride et le carbendazime (42–67 % et 47–50 % respectivement) alors que les concentrations de cyperméthrine diminuaient très peu (6,7–7,1 %) [7].

Le lavage à l'aide d'une solution saline diluée est une méthode utilisable pour réduire la charge de contaminants des fruits et des légumes. Cette méthode pourrait être tout aussi efficace pour réduire les résidus de pesticides sur d'autres produits également. Cette procédure est recommandable car applicable en usage domestique. Le chlorothalonil a été mieux éliminé du chou chinois par une exposition à une solution saline à 1 % (1 g de sel pour 100 mL d'eau) pendant 10 minutes [5].

La durée du trempage [28] et la température de l'eau [29] sont des paramètres pouvant contribuer à améliorer l'élimination des pesticides hydrosolubles. Une durée d'immersion passant de 2 à 5 min accroît le taux d'élimination des pesticides. Les effets du lavage à l'eau dépend du type de pesticides (systémique, de contact), de ses caractéristiques physico-chimiques (hydrosoluble, lipophile) et du temps écoulé depuis le dernier traitement sur le terrain [28].

Le pH de la solution de trempage joue un rôle important dans l'élimination des pesticides de contact. Le trempage dans l'acide citrique (9 %) par exemple est très efficace pour éliminer un maximum de résidus. Les pesticides non systémiques (chlorpyrifos) ainsi que les composés très solubles ont été plus facilement éliminés que les pesticides systémiques (acétamipride) [28]. Le lavage du poivre avec de l'acide acétique ou de l'acide citrique permet aussi d'éliminer les résidus de pesticides. Des différences significatives des niveaux de résidus ont été observées après 5 min d'application de solutions acides pour les trois pesticides sélectionnés dans l'étude (acétamipride, chlorpyrifos, formétanate hydrochlorifide). Les impacts positifs de la durée de lavages avec l'acide acétique (2 et 5 min) ont été mis en évidence pour l'acétamipride tandis que les différences entre les temps d'application de l'acide citrique pour le formétanate et le chlorpyrifos ne sont pas significatives [28].

Le trempage dans des solutions de produits chimiques, tels que le chlore, le dioxyde de chlore, le peroxyde d'hydrogène, l'ozone, l'acide hydroxy peracétique, et les détergents peut être efficace pour réduire le niveau de certains pesticides mais n'est pas recommandé dans le cas des produits alimentaires, puisque ces solutions chimiques peuvent être toxiques.

Les traitements thermiques

Divers traitements thermiques tels que la pasteurisation, le blanchiment, l'ébullition, la cuisson, la vapeur, la mise en conserve, seraient aussi efficaces pour la dégradation de divers pesticides en fonction du type de pesticide et de la durée du traitement.

La diminution des teneurs en résidus de pesticides au cours du traitement thermique peut être due à l'évaporation, la co-distillation, la dégradation thermique qui varient en fonction de la nature chimique du pesticide. Le chlorothalonil s'évapore pendant une cuisson à pression ambiante. Lors du blanchiment des épinards, la concentration de dichlorvos (un insecticide organophosphoré) a diminué de 72 % alors que la concentration d'autres pesticides comme le fenvalérate (insecticide pyréthrianoïde) n'était pas modifiée. Les résidus de chlorothalonil disparaissent (85–98 %) par volatilisation pendant la cuisson à pression ambiante. Par contre les teneurs en thiabendazole (un fongicide benzimidazole) dans les pommes de terre cuites ne sont pas modifiées. Après 5 minutes d'infusion de feuilles de thé, 92 % du diméthoate a disparu mais seules 11 % des teneurs en chlorpyrifos (insecticide organophosphoré) sont éliminées ; par contre un chou cuit au micro-onde ou frit perdra respectivement 60 ou 86 % des teneurs en chlorpyrifos [3]. Des expériences réalisées sur les fraises montrent des réductions de pesticides allant de 42,8 à 92,9 % lorsqu'elles sont cuites pendant 5 minutes dans de l'eau bouillante [28].

Des chercheurs ont réalisé une méta-analyse combinant et quantifiant les effets du mode de cuisson des aliments sur les niveaux de résidus de pesticides via le calcul du ratio (R) de concentration de pesticide après et avant le traitement ($R > 1$ augmentation de la teneur en pesticides et $R < 1$ diminution de la teneur en résidus de pesticides) [25] (Tableau 1). Le blanchiment, l'ébullition, la mise en

Tableau 1 Rapport de la concentration en pesticides calculé à partir d'un ensemble d'études expérimentales réalisées sur les procédés de cuisson de différents fruits et légumes.

Méthodes de cuisson	R	IC 95 %
Friture	0,1	0,02–0,46
Blanchiment	0,21	0,10–0,44
Mise en conserve	0,71	0,46–1,09
Ébullition	0,82	0,58–1,15
Cuisson au four	1,38	0,91–2,09

Ces valeurs sont extraites de la référence [25]. Le rapport (R) représente la concentration moyenne de pesticide après la méthode de cuisson/concentration moyenne de pesticides avant la méthode de cuisson. Le rapport a été exprimé en logarithme numérique, $L = \ln R$, afin de supposer une relation linéaire entre les changements dans le numérateur et les changements dans le dénominateur ($R > 1$: augmentation de la teneur en pesticides et $R < 1$: diminution de la teneur en résidus de pesticides).

conserve, la friture indiquent une réduction des niveaux de résidus, avec un ratio allant de 0,10 à 0,82. La cuisson au four tendrait à augmenter les niveaux de pesticides. Cependant l'intervalle de confiance autour des estimations est assez large en raison des différences de propriétés des pesticides ou de l'effet de matrice, qui n'a pas été pris en compte séparément au cours de l'analyse. Ainsi la cuisson au four, l'ébullition, la mise en conserve peuvent avoir un ratio supérieur ou inférieur à 1 en fonction du végétal, de la nature du pesticide [25].

La pasteurisation peut diminuer les taux de pesticides (organophosphorés par exemple) dans les denrées alimentaires comme le lait. Par contre, certains pesticides organochlorés qui ne sont plus autorisés aujourd'hui mais qui sont encore retrouvés dans l'alimentation en raison de leur caractère persistant ne sont pas sensibles au traitement par la chaleur [5].

Séchage

Les techniques de conservation telles que le séchage, la déshydratation peuvent augmenter ou réduire la teneur en pesticides [16]. Les niveaux de résidus de bénomyl, phosalone, métalaxyl et procymidone dans les raisins séchés au soleil sont identiques à ceux des raisins frais, tandis que ceux de l'iprodione sont plus élevées (1,6 fois) et ceux de la vinclozoline et du diméthoate plus bas (1/3 et 1/5 respectivement). Dans le processus de séchage à l'étuve, le bénomyl, le métalaxyl et la vinclozoline sont présents en quantité égale dans les fruits frais et séchés, tandis que les quantités d'iprodione et de procymidol sont plus faibles dans les raisins secs que dans les fruits frais. Les différences observées entre les deux techniques de séchage pourraient être liées au processus de lavage avant la mise en étuve. Le diméthoate du raisin se dégrade à la lumière du soleil, le phosalone se dégrade plus vite à la lumière du soleil qu'à la chaleur.

Fermentation

Le processus de fermentation peut impacter la teneur en pesticides. Par exemple, au cours du cycle de production de vin, deux types de fermentations sont réalisées : la fermentation alcoolique réalisée par les levures et la fermentation malolactique assurée par les bactéries lactiques. Les levures peuvent dégrader certains pesticides de la classe des pyréthrinoïdes et certaines d'entre elles adsorbent certains pesticides, contribuant ainsi à leur élimination à la fin de la fermentation. Par contre, les bactéries lactiques ne dégradent pas les fongicides utilisés fréquemment en viticulture. En contrepartie, certains pesticides, comme les fongicides diféconazole et le tébuconazole peuvent impacter les bactéries lactiques ainsi que l'activité des levures [16].

Autres techniques

D'autres techniques telles que le raffinage et la salaison peuvent aussi avoir une incidence à des degrés divers sur la teneur en pesticides dans les aliments. La mouture, la cuisson, le maltage et le brassage sont associés à une réduction de la teneur en résidus de pesticides dans les produits finis. Cependant, l'effet dépend de la concentration initiale au moment de la récolte, du substrat/aliment et du type de pesticide [16].

Température de stockage [30]

Dans des conditions de stockage à 25 °C, une diminution progressive et continue a été observée pour les trois résidus de fongicides prochloraz, pyraclostrobine et tébuconazole dans les échantillons de peaux de poires (14 jours de suivi). Les concentrations des résidus des trois fongicides dans la pulpe de poire ont quant à elles augmenté jusqu'au 14^e jour. Lorsque les fruits étaient conservés à 2 °C, les résidus des trois fongicides dans la peau des poires décroissent très lentement sur 180 jours et dans la pulpe de fruits augmentent puis diminuent. Parmi les fongicides, le tébuconazole présentait la plus faible concentration de résidus dans la pulpe de poire (valeur maximale de 0,226 mg/kg) et la demi-vie la plus longue ($\geq 231,0$ jours).

En conclusion, diverses techniques, accessibles, pour certaines, aux consommateurs permettent de réduire au moins en partie les niveaux de pesticides dans les fruits et légumes. L'épluchage et le lavage sont efficaces pour éliminer les pesticides de contact. Le lavage à l'eau sera d'autant plus efficace que sa durée est prolongée. L'ajout de citron ou de vinaigre dans l'eau de rinçage permettra un meilleur impact. Les températures élevées, telles que celles utilisées pour la préparation de conserve ou de confiture, contribuent à une élimination efficace des niveaux de pesticides. Les effets du séchage restent incertains. En effet, certains pesticides sont éliminés par le séchage alors que d'autres se retrouvent plus concentrés. L'efficacité de ces techniques de décontamination dépend de la nature chimique des composés et de leur hydrosolubilité ; leur pertinence n'est donc pas valable pour tous les pesticides.

L'alimentation biologique

Définition et réglementation

Les pesticides utilisables en agriculture biologique (UAB) sont des produits ayant une AMM et dont les substances actives sont inscrites à l'annexe I du règlement UE 2021/1165 et exclusivement d'origine naturelle (animale, végétale, minérale) (<https://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/les-produits-utilisables-en-agriculture-biologique-uab-a989.html>). Des conditions et limites spécifiques, précisées dans cette annexe, peuvent encadrer l'utilisation du produit en production biologique à certains usages (<https://ephy.anses.fr/produits-substances-usages/produits-biocontr%C3%B4le>). Les substances utilisables en agriculture biologique sont listées dans l'annexe II du RCE n° 889/2008. Seuls les produits contenant au moins 95 % d'ingrédients agricoles certifiés biologiques peuvent comporter les termes « biologique » ou « bio » dans la dénomination du produit. Certains aliments ne peuvent pas être « bio » comme l'eau ou le foie gras par exemple, car la pratique du gavage n'est pas autorisée par la réglementation européenne en agriculture biologique (<https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie-pratique/Fiches-pratiques/Agriculture-biologique>). La production biologique et l'étiquetage des produits biologiques sont encadrés par le règlement européen n° 834/2007 qui est ainsi censé garantir au consommateur européen des denrées alimentaires produites sans pesticide ni engrais chimique de synthèse. Néanmoins, le risque de contamination croisée existe (<https://www.economie.gouv.fr/particuliers/comprendre-labels-bios#nonalimentaires>). L'agriculture Zéro Résidus de Pesticides (ZRP) est une pratique responsable dont l'objectif est (i) la réduction de l'utilisation de pesticides (quantité) de sorte que les résidus de pesticides présents dans les fruits et légumes ne dépassent pas les limites de quantification (LQ la plus petite valeur quantifiable par les laboratoires avec une précision acceptable [CE 11945/2015]) ; (ii) en s'appuyant sur une certification HVE (haute valeur environnementale) et les principes de l'agroécologie et (iii) en s'engageant pour des emballages plus respectueux de la planète. La certification HVE concerne des pratiques particulièrement respectueuses de l'environnement, mais n'impose pas nécessairement une réduction d'utilisation des pesticides (<https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-la-haute-valeur-environnementale>).

Niveaux de pesticides dans les aliments issus de l'agriculture biologique

Le rapport de l'EFSA montre que parmi les échantillons issus de l'agriculture biologique 82,8 % ne contenaient pas de résidus quantifiables [31]. Les pesticides présentant un taux de quantification à des niveaux supérieurs à la LQ mais inférieurs à la LMR, étaient les composés de cuivre (79 %), l'ion bromure (15 %), le chlorate (7 %) ; le fosétyl (fongicide), le mercure, les dithiocarbamates et l'oxyde d'éthylène ont été retrouvés mais en moindre quantité. Dans une étude réalisée en Croatie, 34 miels conventionnels sur 45 (75 %)

contenaient un ou deux acaricides de synthèse (le plus souvent du coumaphos), alors que seuls 2 miels biologiques sur 16 (12 %) présentaient des taux quantifiables de ces contaminants. De plus, le miel biologique contenait en moyenne moins de coumaphos, d'amitraz et de son métabolite, que les miels conventionnels [32].

La présence de ces résidus de pesticides dans les denrées issues de l'agriculture biologique est souvent due à une contamination non intentionnelle via l'environnement. Il existe des mesures prises par les opérateurs pour réduire les risques de contamination de leurs produits par les pesticides. Par exemple les ruchers doit être positionnés de façon à ce que dans un rayon de 3 km autour, les sources de nectar et pollen soient constituées à plus de 50 % de culture biologique, d'une flore spontanée, de cultures traitées avec des méthodes ayant une faible incidence sur l'environnement (https://www.certipaq.com/wp-content/uploads/2022/03/AB_Guide_Apiculture_10032022.pdf). En dépit de cela un certain degré de contamination par les pesticides est techniquement inévitable [33].

Agriculture biologique et exposition des consommateurs

Dans une étude française, les auteurs ont estimé l'exposition journalière aux pesticides en fonction du type de régime (omnivore, végétariens, végétariens) des participants de leur cohorte et de l'origine « conventionnelle ou biologique » des denrées alimentaires. Leurs résultats montrent que l'exposition alimentaire aux pesticides s'explique à la fois par la quantité d'aliments d'origine végétale consommée et par les quantités consommées en produits issus de l'agriculture biologique ou conventionnelle. Une forte consommation d'aliments conventionnels d'origine végétale a augmenté l'exposition alimentaire aux pesticides, tandis que la consommation d'aliments biologiques l'a diminuée. Les apports alimentaires de substances actives autorisées dans l'agriculture biologique augmentent toutefois dans les régimes entièrement biologiques [34].

Des études d'intervention sur l'alimentation d'enfants et d'adultes ont confirmé que la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique réduit l'exposition aux pesticides [35]. Par exemple, une étude d'intervention diététique de 5 semaines a été menée auprès de 27 étudiants volontaires hommes et femmes afin d'évaluer les effets de la consommation d'aliments biologiques par rapport à la consommation d'aliments conventionnels et le passage d'un régime alimentaire occidental à un régime méditerranéen riche en fruits et légumes sur l'exposition aux pesticides [36]. Cette étude montre que le changement d'une consommation d'aliments conventionnels à une consommation d'aliments biologiques dans le cadre d'un régime méditerranéen peut réduire de manière significative l'exposition à tous les classes de pesticides (y compris les herbicides, les insecticides, les fongicides, les régulateurs de croissance) et peut réduire l'exposition totale (environnementale + alimentaire) aux pesticides de plus de 90 %. Dans une méta-analyse d'étude d'observations ($n=23$) et d'interventions ($n=27$), la consommation d'aliments biologiques s'est avérée bénéfique en termes de réduction de l'exposition aux pesticides [37].

Alimentation biologique et santé

Les résultats de la méta-analyse citée ci-dessus montrent aussi une association « bénéfique » entre certaines perturbations métaboliques (obésité et indice de masse corporelle) et la consommation d'aliments biologiques [37].

Les études épidémiologiques réalisées dans la cohorte française NutriNet-Santé montrent que l'augmentation de la proportion d'aliments issus de l'agriculture biologique dans le régime est associée à une diminution du risque de certains cancers, et de maladies métaboliques. Même s'il existe des facteurs de confusion résiduels, i.e. les consommateurs d'aliments biologiques ont tendance à avoir des modes de vie plus sains, il existe des arguments mécanistiques en faveur de la plausibilité de la relation pesticide-santé tels que présentés dans la section « Exposition des consommateurs et risque pour la santé ».

Les études concernant les associations entre la consommation d'aliments biologiques pendant la grossesse et les effets sur la santé des mères et de leur progéniture sont rares. Dans une revue publiée en 2023 sur ce sujet, les auteurs ont identifié six études d'observations en Europe [38]. Certaines d'entre elles suggèrent un rôle bénéfique de l'alimentation biologique pour la santé de la mère et de la descendance [35]. Une étude au Danemark montre qu'une plus grande consommation d'aliments biologiques n'est pas associée de manière significative à la fécondabilité, mais une fécondabilité légèrement plus élevée a été observée chez les participantes [39].

Il existe de faibles différences de composition en nutriments entre les aliments issus de l'agriculture biologique et ceux issus de l'agriculture conventionnelle, et leur pertinence pour la santé humaine est sujette à débat. Des apports plus importants en vitamines, minéraux, acides gras bénéfiques seraient possibles mais ne sont pas susceptibles d'avoir un impact sur la santé des populations qui disposent d'un apport suffisant en nutriments [35]. Les teneurs en composés phénoliques seraient légèrement plus élevées dans les fruits et légumes issus de l'agriculture biologique. Il est probable que la teneur en cadmium soit également plus faible dans les cultures céréalières biologiques. Les produits laitiers biologiques, et sans doute aussi les viandes, ont une teneur plus élevée en acides gras oméga-3 par rapport aux produits conventionnels, bien que cette différence n'ait probablement qu'une importance nutritionnelle marginale. L'utilisation prépondérante d'antibiotiques dans la production animale conventionnelle est préoccupante puisque c'est l'une des causes principales de la résistance aux antibiotiques dans la société. L'utilisation d'antibiotiques est moins intensive dans la production biologique [35].

Conclusions

L'utilisation intensive des pesticides en agriculture a conduit à la contamination des différents compartiments de l'environnement (sols, air, eaux, faune et flore). La population est exposée principalement via l'alimentation, essentiellement les fruits et légumes, à des cocktails de pesticides à faibles doses tout au long de la vie. Les pesticides sont des composés biologiquement actifs qui ne sont pas tous spécifiques des cibles contre lesquelles ils ont été conçus,

car certains processus biologiques ont été grandement conservés au cours de l'évolution. Ainsi, certains de ces composés possèdent des cibles et des mécanismes d'action proches de ceux qui sont impliqués dans le développement de certaines pathologies chez l'Homme. Les études épidémiologiques montrent une forte présomption de lien entre l'exposition professionnelle aux pesticides et la survenue de certaines pathologies. Par ailleurs la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique est associée à un plus faible niveau d'exposition chez l'Homme et à un moindre risque de développement de certains cancers et pathologies métaboliques.

Il est important de noter que notre organisme est capable de détoxifier ces composés ; cependant la chronicité et la durée de l'exposition aux pesticides peuvent conduire à un dépassement des capacités de détoxification et d'adaptation de l'organisme et engendrer des effets néfastes sur la santé. De plus, certains métabolites de pesticides peuvent être plus toxiques que la molécule mère. Le dimorphisme sexuel de la réponse aux pesticides est un sujet peu traité dans la littérature. Pourtant certaines études expérimentales montrent des effets différents selon le sexe du modèle. De plus, des mélanges de pesticides même à des doses non toxiques montrent des impacts dans les modèles précliniques.

Ainsi, la prédiction des effets cocktails est aujourd'hui difficile à réaliser, compte tenu de la diversité des effets des pesticides, de leurs niveaux d'interaction, de la durée d'exposition et des capacités d'adaptation de l'organisme.

Les pesticides sont répartis dans les différents compartiments des fruits et légumes selon leur nature chimique, leur action systémique ou de contact, leur solubilité dans l'eau et le type de végétaux. Il est possible par de simples procédés accessibles aux consommateurs de diminuer les niveaux de certains pesticides dans les aliments. L'épluchage et le lavage sont particulièrement efficaces pour réduire les niveaux des pesticides de contact. La plupart des pesticides est aussi éliminée par des traitements thermiques tels que le blanchiment et la mise en conserve. Cependant, l'efficacité de ces différentes méthodes de décontamination varie grandement en fonction de la nature chimique des composés et de leur hydrosolubilité. La consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique reste le moyen le plus efficace pour réduire les expositions aux pesticides.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

References

- [1] Report 2023 - Pesticide residues in food [Internet]. FAO; WHO; 2024 [cité 29 avr 2024]. Disponible sur : <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cc9755en>.
- [2] Muralidhara HS. Removal of pesticides from citrus peel oil. United States Patent 1993;5:558–893.
- [3] Yigit N, Velioglu YS. Effects of processing and storage on pesticide residues in foods. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2020;60(21):3622–41.
- [4] Calvaruso E, Cammilleri G, Pulvirenti A, Lo Dico GM, Lo Cascio G, Giaccone V, et al. Residues of 165 pesticides in citrus fruits using LC-MS/MS: a study of the pesticides distribution from the peel to the pulp. *Nat Prod Res* 2020;34(1):34–8.
- [5] Bajwa U, Sandhu KS. Effect of handling and processing on pesticide residues in food- a review. *J Food Sci Technol* 2014;51(2):201–20.
- [6] Zhang R, Zhang Z, Li R, Tan Y, Lv S, McClements DJ. Impact of pesticide type and emulsion fat content on the bioaccessibility of pesticides in natural products. *Molecules* 2020;25(6):1466.
- [7] Kong Z, Shan W, Dong F, Liu X, Xu J, Li M, et al. Effect of home processing on the distribution and reduction of pesticide residues in apples. *Food Addit Contam A* 2012;29(8):1280–7.
- [8] Guo J, Li M, Liu Y, Wang F, Kong Z, Sun Y, et al. Residue and dietary risk assessment of chiral cyflumetofen in apple. *Molecules* 2018;23(5):1060.
- [9] Wang M, Tian Q, Li H, Dai L, Wan Y, Wang M, et al. Visualization and metabolome for the migration and distribution behavior of pesticides residue in after-ripening of banana. *J Hazard Mater* 2023;446:130665.
- [10] Li X, Song S, Wei F, Huang X, Guo Y, Zhang T. Occurrence, distribution, and translocation of legacy and current-use pesticides in pomelo orchards in South China. *Sci Total Environ* 2024;913:169674.
- [11] Wang J, Cheng C, Zhao C, Wang L. Determination of the absorption, translocation, and distribution of imidacloprid in wheat. *JoVE* 2023;(194):64741.
- [12] Omeroglu PY, Acoglu Celik B, Koc Alibasoglu E. The effect of household food processing on pesticide residues in oranges (*Citrus sinensis*). *Foods* 2022;11(23):3918.
- [13] Castilla-Fernández D, Moreno-González D, Gilbert-López B, García-Reyes JF, Molina-Díaz A. Worldwide survey of pesticide residues in citrus-flavored soft drinks. *Food Chem* 2021;365:130486.
- [14] García-Reyes JF, Gilbert-López B, Molina-Díaz A, Fernández-Alba AR. Determination of pesticide residues in fruit-based soft drinks. *Anal Chem* 2008;80(23):8966–74.
- [15] Santana-Mayor Á, Rodríguez-Ramos R, Socas-Rodríguez B, Díaz-Romero C, Rodríguez-Delgado MÁ. Comparison of pesticide residue levels in red wines from Canary Islands, Iberian Peninsula, and Cape Verde. *Foods* 2020;9(11):1555.
- [16] Cabras P, Angioni A. Pesticide residues in grapes, wine, and their processing products. *J Agric Food Chem* 2000;48(4):967–73.
- [17] Guo L, Li R, Chen W, Dong F, Zheng Y, Li Y. The interaction effects of pesticides with *Saccharomyces cerevisiae* and their fate during wine-making process. *Chemosphere* 2023;328:138577.
- [18] Expertise Collective Inserm. Pesticides et effets sur la santé. Nouvelles données. In: Les éditions inserm. 2021. (Éditions EDP science).
- [19] Expertise Collective Inserm. Pesticides : effets sur la santé. [Internet]. Les éditions Inserm. Paris; 2013. Rapport complet, XII-1001 p. Disponible sur : <http://hdl.handle.net/10608/4820>.
- [20] Rebouillat P, Vidal R, Cravedi JP, Taupier-Letage B, Debrauwer L, Gamet-Payrastré L, et al. Prospective association between dietary pesticide exposure profiles and type 2 diabetes risk in the NutriNet-Santé cohort. *Environ Health* 2022;21(1):57.
- [21] Lukowicz C, Ellero-Simatos S, Régnier M, Polizzi A, Lasserre F, Montagner A, et al. Metabolic effects of a chronic dietary exposure to a low-dose pesticide cocktail in mice: sexual dimorphism and role of the constitutive androstane receptor. *Environ Health Perspect* 2018;126(6):067007.
- [22] Smith L, Klément W, Dopavogui L, de Bock F, Lasserre F, Barretto S, et al. Perinatal exposure to a dietary pesticide cocktail does not increase susceptibility to high-fat diet-induced metabolic perturbations at adulthood but modifies urinary and fecal metabolic fingerprints in C57Bl6/J mice. *Environ Int* 2020;144:106010.

- [23] Forner-Piquer I, Klement W, Gangarossa G, Zub E, de Bock F, Blaquiere M, et al. Varying modalities of perinatal exposure to a pesticide cocktail elicit neurological adaptations in mice and zebrafish. *Environ Pollut* 2021;278:116755.
- [24] Dopavogui L, Cadoret F, Loison G, El Fouikar S, Frenois FX, Giton F, et al. Pre- and postnatal dietary exposure to a pesticide cocktail disrupts ovarian functions in 8-week-old female mice. *IJMS* 2022;23(14):7525.
- [25] Keikotlhaile BM, Spanoghe P, Steurbaut W. Effects of food processing on pesticide residues in fruits and vegetables: A meta-analysis approach. *Food Chem Toxicol* 2010;48(1):1–6.
- [26] Bonnechère A, Hanot V, Jolie R, Hendrickx M, Bragard C, Bedoret T, et al. Effect of household and industrial processing on levels of five pesticide residues and two degradation products in spinach. *Food Control* 2012;25(1):397–406.
- [27] Rasolonjatovo MA, Cemek M, Cengiz MF, Ortaç D, Konuk HB, Karaman E, et al. Reduction of methomyl and acetamiprid residues from tomatoes after various household washing solutions. *Int J Food Properties* 2017;20(11):2748–59.
- [28] Polat B, Tiryaki O. Assessing washing methods for reduction of pesticide residues in Capia pepper with LC-MS/MS. *J Environ Sci Health B* 2020;55(1):1–10.
- [29] Lozowicka B, Jankowska M, Hrynko I, Kaczynski P. Removal of 16 pesticide residues from strawberries by washing with tap and ozone water, ultrasonic cleaning and boiling. *Environ Monit Assess* 2016;188(1):51.
- [30] Fang Q, Wu R, Hu G, Lai A, Wu K, Zhang L, et al. Dissipation behavior, residue distribution and risk assessment of three fungicides in pears. *J Sci Food Agric* 2020;100(4):1757–63.
- [31] European Food Safety Authority (EFSA), Carrasco Cabrera L, Di Piazza G, Dujardin B, Medina Pastor P. The 2021 European Union report on pesticide residues in food. *EFSA [Internet]* 2023 [cité 13 mai 2024];21(4). Disponible sur : <https://data.europa.eu/doi/10.2903/j.efsa.2023.7939>.
- [32] Lazarus M, Tariba Lovaković B, Orct T, Sekovanić A, Bilandžić N, Đokić M, et al. Difference in pesticides, trace metal(loid)s and drug residues between certified organic and conventional honeys from Croatia. *Chemosphere* 2021;266:128954.
- [33] Schleiffer M, Speiser B. Presence of pesticides in the environment, transition into organic food, and implications for quality assurance along the European organic food chain – A review. *Environ Pollut* 2022;313:120116.
- [34] Baudry J, Rebouillat P, Allès B, Cravedi JP, Touvier M, Hercberg S, et al. Estimated dietary exposure to pesticide residues based on organic and conventional data in omnivores, pesco-vegetarians, vegetarians and vegans. *Food Chem Toxicol* 2021;153:112179.
- [35] Brantsæter AL, Ydersbond TA, Hoppin JA, Haugen M, Meltzer HM. Organic food in the diet: exposure and health implications. *Annu Rev Public Health* 2017;38(1):295–313.
- [36] Rempelos L, Wang J, Barański M, Watson A, Volakakis N, Hoppe HW, et al. Diet and food type affect urinary pesticide residue excretion profiles in healthy individuals: results of a randomized controlled dietary intervention trial. *Am J Clin Nutr* 2022;115(2):364–77.
- [37] Jiang B, Pang J, Li J, Mi L, Ru D, Feng J, et al. The effects of organic food on human health: a systematic review and meta-analysis of population-based studies. *Nutr Rev* 2023:nuad124.
- [38] Liu B, Curl CL, Brantsæter AL, Torjusen H, Sun Y, Du Y, et al. Perspective: Organic food consumption during pregnancy and the potential effects on maternal and offspring health. *Adv Nutr* 2023;14(1):12–21.
- [39] Weissert SJ, Mikkelsen EM, Jacobsen BH, Hatch EE, Wesselink AK, Wise LA, et al. Organic food consumption and fecundability in a preconception cohort study of Danish couples trying to conceive. *Paediatr Perinat Epidemiol* 2023;37(1):57–68.