



Revoir

Limites de détection des mycotoxines par bandelettes à flux laminaire : Une critique

Xinyi Zhao ^{1,2} , Hugh J. Byrne ² , Christine M. O'Connor ¹ , James Curtin ³ et Furong Tian ^{1,2,*}

¹ École des sciences alimentaires, santé environnementale, Université technologique de Dublin, D07 ADY7 Dublin, Irlande ; d20127084@mytudublin.ie (XZ); christine.oconnor@tudublin.ie (CMO)

² Institut de recherche FOCAS, Université technologique de Dublin, D08 CKP1 Dublin, Irlande ; hugh.byrne@tudublin.ie

³ Collège d'ingénierie et d'environnement bâti, Université technologique de Dublin, D01 K822 Dublin, Irlande ; james.curtin@tudublin.ie *

Correspondance : furong.tian@tudublin.ie

Résumé : Les mycotoxines sont des produits métaboliques secondaires des champignons. Ils sont de nature toxique, cancérigène et mutagène et constituent une menace sérieuse pour la santé des humains et des animaux, provoquant des maladies graves, voire la mort. Les méthodes rapides, simples et peu coûteuses de détection des mycotoxines sont d'une immense importance et très demandées dans l'industrie alimentaire et des boissons, ainsi que dans l'agriculture et la surveillance environnementale. À cette fin, les bandelettes immunochromatographiques à flux latéral (ICST) ont été utilisées. été largement utilisé dans la sécurité alimentaire et la surveillance environnementale. La littérature à ce jour décrivant le développement des ICST pour la détection de différents types de mycotoxines en utilisant différents nanomatériaux, tailles de nanoparticules et réplicats a été examinée dans le but d'identifier les déterminants les plus importants de la limite de détection (LOD). Il s'avère que la taille des particules et le type de matériaux contribuent de manière significative à la détermination de la LOD. Les tailles de nanoparticules utilisées dans la plupart des études se situent entre 15 et 45 nm et il a été démontré que les ICST à base de nanoparticules d'or présentent la LOD la plus faible. Les perspectives de développement futur potentiel pour réduire les LOD des ICST sont également discutées.

Mots clés : nanoparticules ; la taille des particules ; les mycotoxines ; l'aflatoxine ; toxines fusarium



Citation : Zhao, X. ; Byrne, HJ ; O'Connor, CM; Curtin, J. ; Tian, F.

Limites de détection des mycotoxines par les bandelettes à flux laminaire : une revue. Appl.

Nano2022 , 3, 91-101. <https://doi.org/10.3390/applnano3020006>

Rédacteur académique : Angelo

Maria Taglietti

Reçu : 20 mars 2022

Accepté : 6 avril 2022

Publié : 11 avril 2022

Note de l'éditeur : MDPI reste neutre en ce qui concerne les revendications juridictionnelles dans les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.



Copyright : © 2022 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Les mycotoxines sont des métabolites secondaires naturels toxiques produits par des champignons, par exemple *Aspergillus* et *Fusarium*, que l'on trouve couramment sur les produits agricoles au champ ou pendant le stockage. Ces toxines provoquent des intoxications alimentaires et alimentaires, et beaucoup sont cytotoxiques, cancérigènes, mutagènes ou immunosuppressives [1,2]. L'aflatoxine est produite par *Aspergillus* (A.) *flavus* et A. *parasiticus* et existe sous trois types principaux : B1, B2, G1, et ses effets dangereux ont été bien documentés [1]. Les toxines de *Fusarium* sont produites par *Fusarium* et sont classées en trois grands groupes : la zéaralénone (ZEN), les fumonisines et les trichothécènes [2]. Le ZEN est un composé œstrogénique non stéroïdien ayant un effet œstrogénique toxique, détruisant le système reproducteur des animaux, entraînant par exemple un syndrome œstrogénique chez le porc, malgré sa faible toxicité après administration orale [3]. Les fumonisines ont une forte similitude structurale avec la sphinganine et provoquent des effets toxiques sur les œstrogènes qui peuvent conduire au cancer [4]. Les fumonisines peuvent être divisées en quatre sous-groupes principaux, A, B, C et P, et un sous-type de fumonisine B, la fumonisine B1 (FB1), est la plus toxique et la plus abondante de toutes les fumonisines [5]. Les trichothécènes sont une classe de sesquiterpènes et ont également des effets toxiques sur les œstrogènes sur les performances de reproduction des animaux et des humains. Les trichothécènes comportent quatre sous-groupes principaux : A, B, C et D, et le sous-type de trichothécènes A (T-2) est le plus courant, présentant un danger potentiel pour la santé humaine dans le monde entier [6].

Les mycotoxines apparaissent généralement dans les cultures et les produits alimentaires tels que le maïs, le sorgho, le blé, l'avoine, le riz, le soja, le tournesol, les graines de coton, les piments, le poivre noir, la coriandre, le curcuma,

le gingembre, l'arachide, la pistache, l'amande, la noix, la noix de coco, la noix du Brésil, les fruits secs de la vigne, le vin et le jus de raisin et la liqueur de riz, principalement en raison de la teneur élevée en humidité et des températures propices à la croissance des champignons [7]. Le séchage au champ est une pratique acceptée depuis le début de l'agriculture commerciale, mais il dépend du soleil et du vent, et un séchage mécanique est souvent nécessaire pour réduire la teneur en humidité d'une culture à 12-14 % afin de ralentir la croissance des champignons [8]. La teneur en humidité et la concentration en mycotoxines des grains sont mesurées en continu, depuis la récolte des grains jusqu'à leur vente aux consommateurs [9]. Les méthodes quantitatives les plus courantes sont les tests au four manuel et les tests avec humidimètre [10]. En raison des risques pour la santé humaine et animale, des autorités telles que la Commission européenne ou la US Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration (GIPSA) ont tenté de résoudre le problème des mycotoxines en adoptant des limites réglementaires. Des réglementations sont en vigueur, par exemple, pour les aflatoxines et les toxines fusarium dans certaines denrées alimentaires (CE 1881/2006) [11], et il existe des recommandations concernant les niveaux maximaux de mycotoxines dans les aliments pour animaux (CE (2006/576/CE)) [12]. Parmi les aflatoxines, l'aflatoxine B1 (AFB1) est la plus toxique en tant que puissant cancérigène et de nombreux pays ont mis en œuvre des limites maximales de résidus (LMR) d'AFB1 [13]. En Chine, la « GB 2761-2017 Food Mycotoxin Limit » fixe strictement la LMR d'AFB1 dans le blé, la farine de blé, le maïs et la farine de maïs à 20 ng/mL [13]. Parmi toutes les toxines fusarium, les ZEN sont les plus fortement associés à des effets toxiques chroniques et mortels chez les animaux et les humains [5,6]. En Italie, la LMR de ZEN dans les céréales et produits céréaliers est de 100 ng/mL [14], et de 50 ng/mL en Australie [15].

Actuellement, les plateformes de tests portables rapides pour la détection et la quantification des mycotoxines potentiellement dangereuses dans la production alimentaire et des boissons sont très limitées. Les techniques les plus utilisées pour détecter les AFL sont la chromatographie sur couche mince (CCM) et la chromatographie liquide haute performance (HPLC). Cependant, ces méthodes nécessitent une préparation approfondie des échantillons, des instruments coûteux et une opération professionnelle. Alternativement, un test immuno-enzymatique (par exemple ELISA) a été développé avec succès pour les AFL [16]. Cependant, l'ELISA nécessite également des étapes d'incubation et de lavage qui sont principalement confinées aux laboratoires [17]. Ainsi, il existe un besoin de techniques de test rapides, rentables et précises pour la détection définitive des empreintes digitales des marqueurs de maladies et environnementaux à de faibles concentrations.

Les technologies telles que les lecteurs de microplaques sont basées sur des méthodologies approximatives « non traçables » et reposent sur une préparation et un nettoyage fastidieux des échantillons [18,19]. Les techniques de tests existantes, telles que les tests immunitaires et moléculaires, par exemple les approches ELISA et de réaction en chaîne par polymérase, permettent une détection précise et sensible des mycotoxines [19-21]. Cependant, ces méthodes demandent beaucoup de travail et de temps (nécessitant normalement des dizaines de personnes et plusieurs heures) [20-23].

Les méthodes alternatives et plus rapides ne sont pas précises et donnent souvent des résultats faussement positifs/négatifs [24]. Il existe donc un besoin de techniques de test rapides, rentables et précises pour la détection des mycotoxines afin de garantir la sécurité et la qualité des aliments. La microfluidique, le laboratoire sur puce, la nanospectroscopie intelligente, le laboratoire dans une fibre et les technologies de capteurs font partie des interfaces technologiques clés qui ont été optimisées de la micro à la nano-échelle [24-26]. Les technologies de laboratoire sur puce microfluidique/optofluidique sont une solution couramment utilisée pour la détection des mycotoxines, en particulier les tests sur le lieu d'intervention ; intégrer des modules fonctionnels couramment utilisés dans les laboratoires sur une petite puce, pour les tests de biomarqueurs [26,27]. La technologie offre une caractéristique unique d'un rapport surface de détection/volume élevé pour un temps d'analyse court, permettant des tests de diagnostic complexes [27,28]. Cependant, les « goulots d'étranglement d'interconnexion et de lecture » et l'évacuation de la chaleur sont deux défis largement reconnus limitant les performances [29].

Les bandelettes immunochromatographiques à flux latéral (ICST) ont reçu une attention croissante pour l'analyse qualitative et quantitative dans différents domaines [17]. Par exemple, les bandelettes de désoxynivalénol de Neogen Corp ont été largement utilisées dans le domaine de la sécurité alimentaire et de la surveillance environnementale [30]. Les structures sandwich sont généralement utilisées dans la détection à grande échelle, tandis que les immunoessais sensibles à base magnétorésistive géante sont utilisés pour la détection multiplex des mycotoxines. Différents nanomatériaux ont été conjugués à des anticorps pour améliorer les limites de détection

spécificité pour la détection et la quantification des mycotoxines (normalement 1 à 20 ng/ pour la détection de l'aflatoxine B1 dans l'alimentation des porcs [7]. Liao et Li (2010) ont ensuite consacré Cependant, en raison de l'encombrement de leurs systèmes de lecture, leurs applications constituent un effort important pour étudier l'effet des nanocomposites argent-or cœur-coquille sur le

..(positifs ou négatifs) ou des informations semi-quantitatives sur la concentration de l'analyte, et

Il satisfait aux exigences des tests portables et riches en fonctionnalités. Les ICS1 ne pouvaient pas satisfaire aux exigences d'applications pratiques [32]. Par conséquent, beaucoup

Le marché se développe rapidement et les outils de diagnostic portables fournissent un o Des dispositifs

ICST permettant des tests quantitatifs de concentration d'analytes ont été par la suite augmentés, la disponibilité des spécimens de sang a été réduite, les coûts [36]. Cet article a été développé et a

quantification (normalement 1 à 20 ng/mL) [33]. Cependant, en raison de l'encombrement de leur lecture

Développements de la technologie des STIC pour différents types de mycotoxines; dans les systèmes, leurs applications sont limitées [34,35]. Évidemment, un lecteur STIC basé sur

différentes matériaux pour les nanoparticules, différentes tailles de nanoparticules et le remplacement d'un appareil mobile seraient avantageux, car ils satisferaient aux exigences des appareils portables.

limite de détection (LOD) des microdoses et leur adaptation aux tests mobiles et riches en fonctionnalités.

Les outils de diagnostic offrent l'opportunité d'augmenter la disponibilité des soins de santé et

diminuer les coûts [36]. Cet article passe en revue les développements de la technologie des STIC pour différents

types de mycotoxines, influence des différents matériaux pour les nanoparticules, différentes tailles

2. Méthodes de recherche de nanoparticules, et la réplication sur la limite de détection (LOD) des mycotoxines, et leurs

adaptation aux systèmes de lecture mobiles et/ou portables.

Les informations ont été collectées dans Google Scholar et Science Direct avec la cotoxine k, le test

2. Méthodes de recherche de bandelette et la LOD. Vingt-cinq articles évalués par des pairs de 2006 à 2020 ont été analysés pour

identified at the bank. Gravelle, Schreiff, & Shierma-Dierichsen (Abstracts 145-16) also informed us that it

IOD - les articles examinés de 2006 à 2021 ont été comparés

5: Fumonisine B1 : 5 : Trichothécène-A : 5) dans la figure 1. Veuillez noter que certains p permettent d'identifier la LOD la plus faible pour différentes mycotoxines (Aflatoxine B1 : 10 : Zéaralénone : 5 :

d'identifier la LOD la plus faible pour différentes mycotoxines (Aflatoxine B₁: 10⁻⁵, Zéaralénone: 5
la LOD de plus d'une mycotoxine, mais uniquement de la mycotoxine ayant la plus faible fumonisine
trichothécène + A₁: 3) dans la table 9. Veuillez noter que certains articles incluent

L'abonnement est en cours de traitement. Merci de patienter quelques instants.

Le document est composé de deux parties : une première partie qui rassemble les données par type de matériel, et une deuxième partie qui rassemble les données par type de matériel et par type de matériel.

Le document est discuté ici. Les données ont été rassemblées par type de mycotoxine, type de matériaux pour les nanoparticules, la taille des particules (nm), le nombre de répétitions et l'année (tableau 1).

nanoparticule, taille des particules (nm), nombre de répétitions et année (Tableau 1).

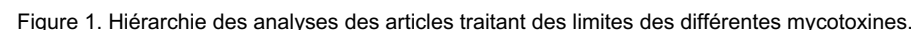


Figure A. Analyse statistique de l'ANOVA avec des articles contenant des métaux (des différents métaux) et des toxines (test de somme), le test de Dunn (post-hoc) et la régression multilinéaire ont été utilisés pour analyser les paramètres déterminants significatifs de la LOD.

Tableau 1. Papiers avec limite de détection des mycotoxines.

Taper	Particule	Taille (nm)	Année	Réplique	Standard Déviations	Coefficient de Variation (%)	LOD (ng/ml)	Référence
AFB1	Or	n / A	2013	n / A	n / A	n / A	0,1	[dix]
	Or + téléphone	14	2019	6	0,01	2,7	0,3	[36]
	Or	45	2015	6	0,09	9h47	0,00032	[37]
	Or	n / A	2014	n / A	n / A	n / A	0,03	[38]
	Or + téléphone	30	2019	6	n / A	1,5	2	[39]
	Or	25	2006	11	0,44	10,4	2,5	[40]
	Or	n / A	2013	3	n / A	n / A	2	[41]
	Or + téléphone	n / A	2019	9	n / A	n / A	2	[42]
	Or + téléphone	1,4	2017	5	n / A	n / A	3	[43]
	Or + téléphone	40	2013	5	n / A	n / A	5	[44]
FB1	Or	n / A	2007	12	0,3	6,67	0,1	[45]
	Or	na	2014	5	0,18	6,01	0,12	[46]
	Or	30	2017	3	n / A	n / A	0,6	[47]
	Or	20	2020	na	na	na	2,5	[48]
	Or	40	2014	3	0,9	10,6	5	[49]
ZEN	Or	25	2017	3	0,16	6,2	0,07	[50]
	Or	17	2020	5	0,09	4,9	0,25	[51]
	Argent	n / A	2018	3	n / A	n / A	0,25	[52]
	Argent	15	2018	dix	0,22	4,85	0,58	[53]
	Carbone	190	2016	3	0,05	3,79	12	[54]
T-2	Or	n / A	2019	2	n / A	n / A	0,08	[55]
	Or	30	2017	3	n / A	n / A	0,1	[56]
	Argent	n / A	2015	n / A	n / A	n / A	0,9	[57]
	Argent	45	2017	n / A	n / A	n / A		[58]
	Carbone	120	2017	n / A	n / A	n / A	5 13	[59]

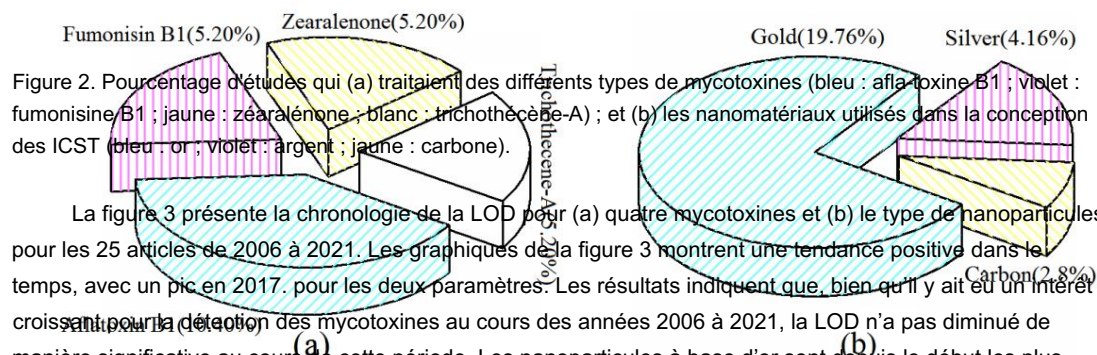
Remarque : na signifie sans objet/inconnu.

3. Résultats

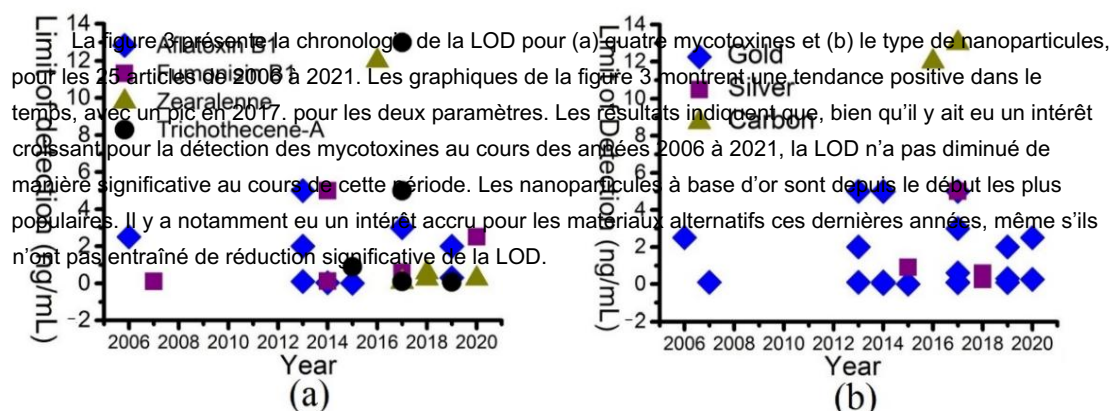
Le tableau 1 présente une ventilation de l'analyse des 25 articles évalués par des pairs identifiés, selon l'espèce de mycotoxine, la nanoparticule utilisée et la taille des nanoparticules, répliques et, le cas échéant, la LOD signalée.

Les plages des limites de détection sont représentées sur la figure 2, selon (a) différents mycotoxines et (b) différentes ICST à base de nanoparticules, dans le but d'élucider lesquelles l'un d'eux a généralement une limite de détection basse. La figure 2a indique que 40 % des articles s'est concentré sur l'Aflatoxine B1, qui est la mycotoxine la plus étudiée. 20% supplémentaires des articles portaient sur la Fumonisine B1, 20 % des articles portaient sur la Zéaralénone et 20 % des les articles portaient sur le Trichothécène-A. La figure 2b indique que les nanoparticules d'or sont les nanoparticule la plus fréquemment étudiée dans la littérature examinée.

La figure 3 présente la chronologie de la LOD pour (a) quatre mycotoxines et (b) le type de nanoparticules, dans les 25 articles de 2006 à 2021. Les graphiques de la figure 3 montrent un effet positif tendance dans le temps, avec un pic en 2017 pour les deux paramètres. Les résultats indiquent que, même si il y a eu un intérêt croissant pour la détection des mycotoxines au fil des années 2006 à 2021, la LOD n'a pas diminué de manière significative au cours de la période. Nanoparticules à base d'or ont été les plus populaires dès le départ. Il y a notamment eu un intérêt accru pour matériaux alternatifs ces dernières années, même s'ils n'ont pas produit d'impact significatif réduction de la LOD.



La figure 3 présente la chronologie de la LOD pour (a) quatre mycotoxines et (b) le type de nanoparticules, pour les 25 articles de 2006 à 2021. Les graphiques de la figure 3 montrent une tendance positive dans le temps, avec un pic en 2017, pour les deux paramètres. Les résultats indiquent que, bien qu'il y ait eu un intérêt croissant pour la détection des mycotoxines au cours des années 2006 à 2021, la LOD n'a pas diminué de manière significative au cours de cette période. Les nanoparticules à base d'or sont depuis le début les plus populaires. Figure 2. Pourcentage d'études qui (a) ont abordé les différents types de mycotoxines (Bleu : intérêt accru pour les matériaux à base de carbone ; violet : fumonisine B1 ; jaune : zéaralénone ; blanc : trichothécène-A) ; et (b) le nano- produit une réduction significative de la LOD (Bleu : Or ; Violet : Argent ; Jaune : Carbone).



La figure 4a présente la dépendance de la LOD sur la taille des nanoparticules dans les 19 articles pour quatre mycotoxines. La figure 4b présente la dépendance de la LOD sur la taille des différences de type de nanoparticule concernée dans les 19 articles. On peut voir que les données sont principalement regroupées dans une plage de tailles de particules allant de 15 nm à 45 nm, et la LOD est de 0,1 à 5 ng/mL. Bien que la figure 4b indique deux mesures aberrantes pour la zéaralénone et le trichothécène-A, d'autres mesures de celles-ci relèvent du groupe, et la figure 4b indique que ces valeurs aberrantes sont dues aux performances relativement médiocres des dispositifs à base de nanoparticules de carbone.

La figure 4a présente la dépendance de la LOD sur la taille des nanoparticules dans les 19 articles pour quatre mycotoxines. La figure 4b présente la dépendance de la LOD sur la taille des différences de type de nanoparticule concernée dans les 19 articles. On peut voir que les données sont principalement regroupées dans une plage de tailles de particules allant de 15 nm à 45 nm, et la LOD est de 0,1 à 5 ng/mL. Bien que la figure 4b indique deux mesures aberrantes pour la zéaralénone et le trichothécène-A, d'autres mesures de celles-ci relèvent du groupe, et la figure 4b indique que ces valeurs aberrantes sont dues aux performances relativement médiocres des dispositifs à base de nanoparticules de carbone.

La figure 4a présente la dépendance de la LOD sur la taille des nanoparticules dans les 19 articles pour quatre mycotoxines. La figure 4b présente la dépendance de la LOD sur la taille des différences de type de nanoparticule concernée dans les 19 articles. On peut voir que les données sont principalement regroupées dans une plage de tailles de particules allant de 15 nm à 45 nm, et la LOD est de 0,1 à 5 ng/mL. Bien que la figure 4b indique deux mesures aberrantes pour la zéaralénone et le trichothécène-A, d'autres mesures de celles-ci relèvent du groupe, et la figure 4b indique que ces valeurs aberrantes sont dues aux performances relativement médiocres des dispositifs à base de nanoparticules de carbone.

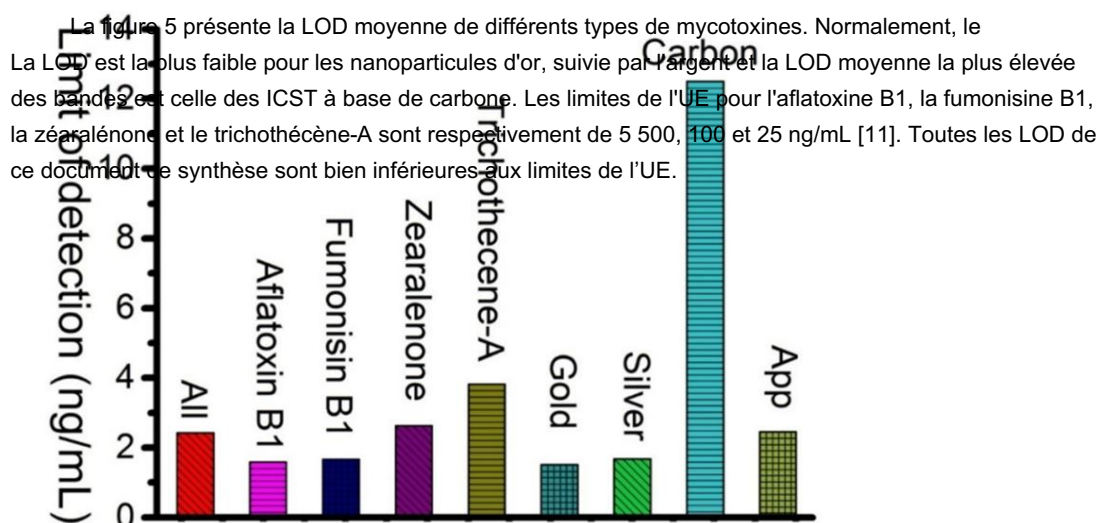
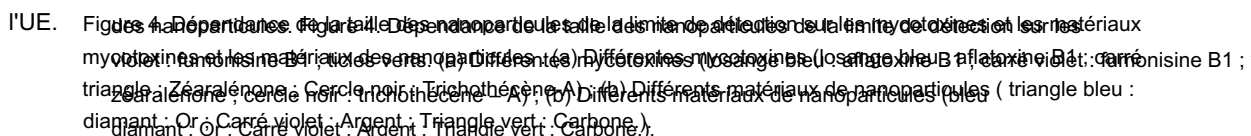


Figure 5. Limites moyennes de détection des bandelettes de différents types de mycotoxines.

Figure 5. Limites moyennes de détection dans les ensembles de données basées sur la taille des particules et les réplications, Mycotoxine, Nanoparticule et Phone ont été analysées par ANOVA à trois voies. De ces trois variables, une seule variable (nanoparticules) contribue de manière significative au résultat. Puisqu'il manque des valeurs dans les ensembles de données sur la taille des particules et les réplications, $M = (p = 1,75 \times 10^{-7})$. Les résultats de l'ANOVA avec une technique non paramétrique (Kruskal – Wallis de rang χ^2) et du test de Dunn (post-hoc) indiquent que la différence significative se situe entre variables, une seule variable (Nanoparticule) contribue de manière significative aux résultats. Les groupes de nanoparticules, l'or et la détection des bandelettes de différents types de mycotoxines, $1,75 \times 10^{-7}$ (les résultats de l'ANOVA sont de Kruskal – Wallis et le test de Dunn (post-hoc) indiquent que le Kruskal – Wallis se situe entre les groupes de nanoparticules d'or et les groupes de nanoparticules sans or. Il n'y a pas de différence statistique significative entre la LOD telle que lue par un téléphone mobile ou la toxine, les nanoparticules et le téléphone ont été analysés par ANOVA à trois voies. De ces trois groupes de nanoparticules, l'or et l'argent. L'ANOVA donne un résultat non paramétrique si on $(p = 0,153)$, nique (une seule variable (Nanoparticule) contribue de manière significative au résultat, $p = 1,75 \times 10^{-7}$). Les résultats de l'ANOVA sont obtenus avec une technique non paramétrique (rang de Kruskal – Wallis et le test de Dunn (post-hoc) indiquent que la différence significative se situe entre la publication et la prédiction. La régression linéaire avait un $R^2 = 0,866$, la taille des particules sur les groupes de nanoparticules. Il n'y a pas de différence statistique significative entre la LOD telle que lue par les groupes de nanoparticules, l'or et l'argent. L'ANOVA donne un résultat non paramétrique si on $(p = 0,153)$, téléphone ou autre $(p = 0,153)$, les résultats de l'ANOVA sont de Kruskal – Wallis et le test de Dunn (post-hoc) indiquent que la différence significative se situe entre les groupes de nanoparticules d'or et les groupes de nanoparticules sans or. Il n'y a pas de différence statistique significative entre la LOD telle que lue par un téléphone mobile ou la toxine, les nanoparticules et le téléphone ont été analysés par ANOVA à trois voies. De ces trois groupes de nanoparticules, l'or et l'argent. L'ANOVA donne un résultat non paramétrique si on $(p = 0,153)$, nique (une seule variable (Nanoparticule) contribue de manière significative au résultat, $p = 1,75 \times 10^{-7}$). Les résultats de l'ANOVA sont obtenus avec une technique non paramétrique (rang de Kruskal – Wallis et le test de Dunn (post-hoc) indiquent que la différence significative se situe entre la publication et la prédiction. La régression linéaire avait un $R^2 = 0,866$, la taille des particules sur une régression linéaire multivariée a été réalisée pour explorer la relation entre la diction de la LOD ($R^2 = 0,904$) et le type de particule lors de la prédiction de la LOD ($R^2 = 0$). LOD et les paramètres de type de mycotoxine, type de nanoparticule, taille des particules, année de publication et réplication. La régression linéaire avait un $R^2 = 0,866$, une taille de particule lors de la prédiction de la LOD ($R^2 = 0,904$) et un type de particule lors de la prédiction de la LOD ($R^2 = 0,901$).

4. Discussion

La figure 2a illustre les aflatoxines B1 les plus mentionnées. Il s'agissait de la fumonisine B1, de la zéaralénone et du trichothécène-A, par ordre décroissant. Les nanoparticules d'or sont le matériau le plus étudié, comparé à l'argent et au carbone (Figure 2).

Les résultats indiquent qu'il y a eu un intérêt croissant pour la détection des mycotoxines par ICST au cours des années 2006 à 2021 (Figure 3). Cet intérêt croissant est peut-être dû au développement des nanotechnologies dans le contrôle de la qualité des aliments stockés [60].

La majorité des articles à faible LOD impliquaient des nanoparticules d'or (Tableau 1). De plus, la LOD moyenne de l'or est bien inférieure à celle des dispositifs à base de nanoparticules d'argent et de carbone. Il ressort facilement des figures 4a et b que les tailles de la plupart des nanoparticules sont comprises entre 15 et 45 nm et que leurs LOD sont relativement faibles. La gamme de tailles de nanoparticules la plus populaire pour la détection des mycotoxines est celle des nanoparticules d'or comprises entre 15 et 45 nm (Figure 4). L'analyse statistique montre que la taille des particules est le déterminant le plus important de la LOD ($R^2 = 0,904$), le second étant le type de particule. La taille des nanoparticules d'or et le rapport anticorps/nanoparticules d'or peuvent être contrôlés avec précision. Dans le même temps, leur faible toxicité a été confirmée dans les cellules humaines et les champignons [61–63]. De plus, les ions argent se sont révélés toxiques pour le poisson zèbre, les bactéries et les cellules souches de souris [62–67]. Par conséquent, les nanonoparticules d'or constituent un meilleur choix pour les applications de bandelettes de test immunochromatographiques.

On constate également que la LOD de l'aflatoxine B1 est bien inférieure aux valeurs atteintes pour la fumonisine B1, la zéaralénone et la trichothécène-A. Cependant, les valeurs moyennes de la zéaralénone et du trichothécène-A sont significativement influencées par les mesures basées sur les nanoparticules de carbone (Figure 4a). Le type de mycotoxine n'est pas un déterminant important de la LOD ($p = 0,118$). Les niveaux maximaux recommandés d'aflatoxine B1, de fumonisine B1, de zéaralénone et de trichothécène-A dans les aliments pour animaux par les réglementations CE sont respectivement de 5, 500, 100 et 25 ng/mL, et les valeurs déclarées pour la LOD des ICST se situent dans ces limites.

Cette revue montre également que la LOD avec les systèmes de lecture basés sur smartphone est similaire à celle obtenue avec d'autres moyens ($p = 0,153$), bien que les données disponibles à ce jour soient rares. L'application pour smartphone est une méthode prometteuse utilisée dans la détection de la concentration quantitative de mycotoxines par bande immunochromatographique à flux latéral, et son développement croissant fournira suffisamment de données dans la littérature pour comparer l'efficacité de la détection.

Les données présentées dans cet article datent de 2006 à 2021, mais la majorité date de 2013 à 2021. Les figures 3a et b montrent que la LOD des mycotoxines n'a pas diminué de manière continue au cours des dernières années. L'année n'est donc pas un déterminant de la LOD ($p = 0,153$).

De plus, la réduction de la LOD n'est peut-être pas le seul objectif, car les LOD indiquées dans ce document de synthèse sont toutes conformes aux exigences de l'UE. Il est important de caractériser pleinement les performances analytiques d'une détection fiable des mycotoxines afin de comprendre sa capacité et ses limites, et de garantir qu'elle est « adaptée à son objectif ». Par exemple, la LOD peut très bien se situer à une certaine concentration inférieure à la plage linéaire d'un test. Une approche traditionnelle et typique pour estimer la LOD consiste à mesurer des répétitions, généralement $n = 20$, d'un calibrateur zéro ou d'un échantillon blanc, à déterminer la valeur moyenne et l'écart-type, et à calculer la LOD comme la moyenne $+2$ SD [68]. Pour établir ces paramètres, un fabricant utiliserait des nanoparticules d'or d'une taille comprise entre 15 nm et 45 nm et testerait 20 répétitions d'échantillons pour augmenter la robustesse et la confiance statistique de l'estimation.

La matrice d'échantillon complexe peut fortement supprimer le signal de réponse ICST, au détriment des performances analytiques [69]. Pour répondre à ces limitations et défis, enrichir les échantillons et améliorer les tests, les mycotoxines peuvent être bioconjuguées avec des nanostructures multimodales pour le traitement des échantillons (70–72). Les analytes présents dans un échantillon peuvent être préconcentrés et/ou amplifiés pour améliorer la limite de détection [69]. Différentes bandelettes uniques de mycotoxines ont été commercialisées. Il est souvent observé que différentes mycotoxines coexistent dans un même échantillon. La détection multiplexée ajoute une nouvelle dimension pour augmenter l'efficacité des tests de mycotoxines [73]. Les matériaux actifs tels que les particules magnétiques, les points quantiques, les fluorophores et les nanoparticules peuvent être conjugués avec des anticorps pour améliorer les réponses ICST (64).

An aperçu schématique de la stratégie de mesure de divers types de mycotoxines us- Un aperçu schématique de la stratégie de mesure de divers types de mycotoxines

ing enrichissement multiplex pour échantillons, diverses nanoparticules à base de bandes à flux laminaire utilisant un enrichissement multiplex pour échantillons, diverses nanoparticules à base de flux laminaire et l'utilisation d'une lecture sur smartphone est illustrée à la figure 6. Elle suggère des stratégies telles que : (i) les bandes et l'utilisation d'une lecture sur smartphone est illustrée à la figure 6. Elle suggère des stratégies telles que :

(i) utilisation de nanoparticules multimodales conjuguées à des anticorps contre les mycotoxines pour enrichir le con-

(ii) utilisation de nanoparticules multimodales conjuguées à des anticorps contre les mycotoxines pour enrichir la concentration des mycotoxines dans les échantillons ;

(iii) l'utilisation de divers marqueurs (par exemple, partie magnétique - la concentration de mycotoxine dans les échantillons ; (ii) l'utilisation de divers marqueurs (par exemple, partie magnétique)

des points quantiques, fluorophores sur nanoparticules d'or qui peuvent être des options viables pour les particules, points quantiques, fluorophores sur nanoparticules d'or qui peuvent être des options viables

les STIC multiples ; (iii) le développement d'applications pour smartphones et de transfert de données, pour grâce à quoi les couleurs des lignes de test sont analysées et converties en concentrations pour lesquelles les couleurs des lignes de test sont analysées et converties en concentrations pour lesquelles les

fournir une prise de décision avancée.

fournir une prise de décision avancée.

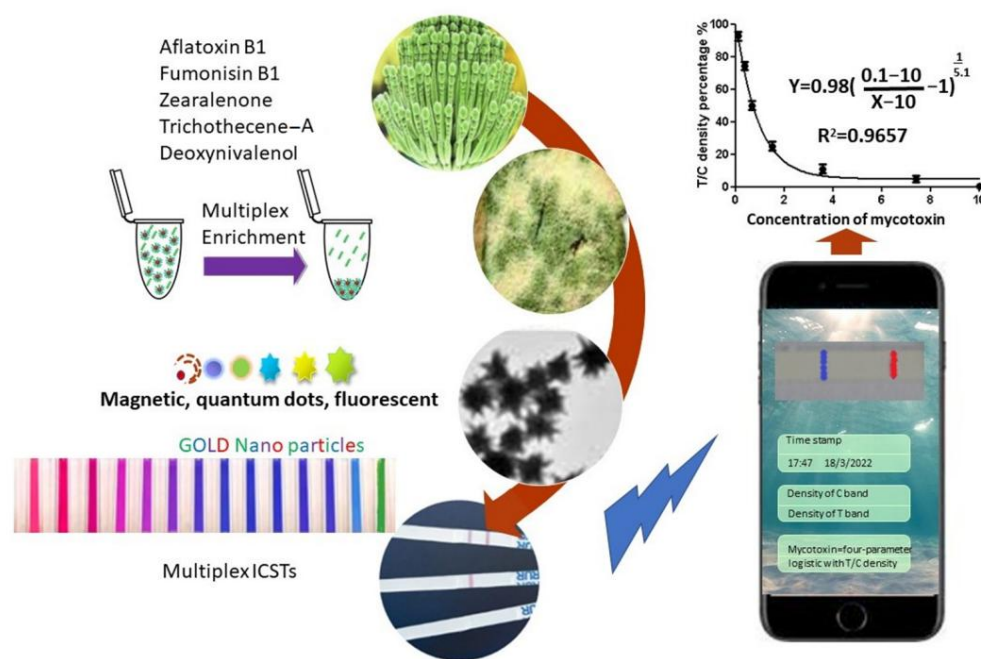


Figure 6. Schéma du protocole de mesure de différents types de mycotoxines par enrichissement multiplexe d'échantillons et de diverses nanoparticules, basé sur des bandes à flux laminaire et utilisant un enrichissement tplex pour échantillons et nanoparticules diverses, à base de bandes à flux laminaire et utilisant un smartphone.

[illegible]

Contributions des auteurs : Conceptualisation, XZ et FT ; méthodologie, XZ ; logiciels, FT, validation - XZ ; analyse, XZ ; analyse formelle, XZ ; questions, XZ ; ressources, FT ; données, FT ; originalité - préparation du projet, XZ ; rédaction - révision et édition, HBP, FT et CMQ ; visualisation, XZ ; supervision, FT, CMQ et JC ; administration de projet, FT ; acquisition de financement, FT Tous les auteurs avoir lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Déclaration du comité d'examen institutionnel : sans objet.

Déclaration de consentement éclairé : sans objet.

Déclaration de disponibilité des données : Cette étude n'a rapporté aucune donnée.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

- Kumar, P.; Mahato, Danemark; Kamlé, M.; Mohanta, savoirs traditionnels; Kang, SG Aflatoxines : Une préoccupation mondiale pour la sécurité alimentaire, la santé humaine et Leur gestion. *Devant. Microbiol.* 2017, 7, 2170. [\[Réf. croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Borzekowski, A.; Anggriawan, R.; Auliyati, M.; Kunte, H.-J.; Koch, M.; Rohn, S.; Karlovsky, P.; Maul, R. Formation de zéaralénone Métabolites dans la fermentation du tempeh. *Molécules* 2019, 24, 2697. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Rogowska, A.; Pomastowski, P.; Sagandykova, G.; Buszewski, B. Zearalenone et ses métabolites : effet sur la santé humaine, méthodes de métabolisme et de neutralisation. *Toxicon* 2019, 162, 46-56. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Périncheris, L.; Lalak-Ka 'nczugowska, J.; St 'epie 'n, L. Mycotoxines produites par *Fusarium* dans les interactions plantes-pathogènes. *Toxines* 2019, 11, 664. [\[CrossRef\]](#)
- Yu, S.; Jia, B.; Liu, N.; Yu, D.; Wu, A. Évaluation de la toxicité individuelle et combinée des mycotoxines fumonisines dans les cellules épithéliales gastriques humaines . *Int. J. Mol. Sci.* 2020, 21, 5917. [\[Réf. croisée\]](#)
- Adhikari, M.; Négi, B.; Kaushik, N.; Adhikari, A.; Al-Khedhairi, AA; Kaushik, NK; Choi, Mycotoxine EH T-2 : effets toxicologiques et stratégies de décontamination. *Oncotarget* 2017, 8, 33933-33952. [\[Référence croisée\]](#)
- Delmulle, BS; De Saeger, SM; Sibanda, L.; Barna-Véto, I.; Van Peteghem, CH Développement d'une bandelette à flux latéral basée sur un test immunologique pour la détection rapide de l'aflatoxine B1 dans l'alimentation des porcs. *J. Agric. Chimie alimentaire.* 2005, 53, 3364-3368. [\[Référence croisée\]](#)
- Soleil, K.; Jian, F.; Jayas, DS; Blanc, NDG Changements de qualité du canola à haute et faible teneur en huile pendant l'entreposage : Partie I – Durée d'entreposage sécuritaire à des températures constantes. *J. Produit stocké. Rés.* 2014, 59, 320-327. [\[Référence croisée\]](#)
- Navarro, JL; Biglione, C.; Paesani, C.; Moiraghi, M.; Léon, AE; Steffolani, ME Effet du processus de perlage du blé sur la composition et le profil nutritionnel de la farine et ses performances panifiables. *Int. J. Food Sci.* 2022, 57, 249-257. [\[Référence croisée\]](#)
- Anfossi, L.; Baggiani, C. Tests immunologiques à flux latéral pour les aflatoxines B et G et pour l'aflatoxine M1. Dans *Aflatoxines-Progrès récents et perspectives d'avenir*; Razzaghi-Abyaneh, M., éd.; InTech : Rijeka, Croatie, 2013; Volume 15, pages 315 à 340.
- Commission européenne. Règlement de la Commission européenne n° 1881/2006 fixant des limites maximales pour certains contaminants dans denrées alimentaires. Désactivé. *J.Eur. Union* 2006, 364, 5-24.
- Commission européenne. Recommandation 2006/576/CE de la Commission européenne relative à la présence de désoxynivalénol, de zéaralénone, d'ochratoxine A, T-2 et HT-2 et de fumonisines dans les produits destinés à l'alimentation animale. Désactivé. *J.Eur. Union* 2006, 229, 7-9.
- Liu, J.; Applegate, T. Zearalenone (ZEN) chez le bétail et la volaille : dose, toxicocinétique, toxicité et oestrogénicité. *Toxines* 2020, 12, 377. [\[Référence croisée\]](#)
- Bertuzzi, T.; Camardo Leggieri, M.; Battilani, P.; Pietri, A. Cooccurrence de trichothécènes de types A et B et de zéaralénone dans le blé cultivé dans le nord de l'Italie au cours des années 2009-2011. *Additif alimentaire. Contam. Partie B* 2014, 7, 273-281. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Tan, DC; Flematti, GR; Ghisalberti, EL; Sivasithamparam, K.; Chakraborty, S.; Obanor, F.; Barbetti, MJ Mycotoxines produites par les espèces de *Fusarium* associées aux pâturages de légumineuses annuelles et aux « troubles du refus alimentaire des moutons » en Australie occidentale. *Mycotoxine Res.* 2011, 27, 123-135. [\[Référence croisée\]](#)
- Radoi, A.; Targa, M.; Prieto-Simon, B.; Marty, JL Test immuno-enzymatique (ELISA) basé sur des méthodes superparamagnétiques nanoparticules pour la détection de l'aflatoxine M1. *Talante* 2008, 77, 138-143. [\[Référence croisée\]](#)
- Sajid, M.; Kawde, A.-N.; Daud, M. Conceptions, formats et applications du test à flux latéral : une revue de la littérature. *J. Saudi Chem. Soc.* 2015, 19, 689-705. [\[Référence croisée\]](#)
- Zhang, J.; Ramu, V.; Zhou, X.-Q.; Frias, C.; Ruiz-Molina, D.; Bonnet, S.; Roscini, C.; Novio, F. Nanoparticules polymères de coordination photoactivables à base de ruthénium pour la chimiothérapie induite par la lumière. *Nanomatériaux* 2021, 11, 3089. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Huang, Y.; Du, Z.; Zheng, T.; Jing, W.; Liu, H.; Liu, X.; Mao, J.; Zhang, X.; Cai, Q.; Chen, D.; et coll. Microéchafaudages polyorganophosphazènes antibactériens, conducteurs et ostéocompatibles pour la réparation des anomalies calvaires infectieuses. *J. Bioméd. Maître. Rés. A.* 2021, 109, 2580-2596. [\[Référence croisée\]](#)
- Khaled, MQ; Thalij, KM Effet du maïs contaminé par l'aflatoxine B1 et de leurs produits sur certains paramètres physiologiques chez les rats de laboratoire. Dans *Série de conférences IOP : Sciences de la Terre et de l'environnement, Actes de la quatrième Conférence internationale sur les sciences de l'agriculture et du développement durable, Babil, Irak, 4-5 octobre 2021*; Éditions IOP : Bristol, Royaume-Uni, 2021; Tome 910.
- Mayo, ML; Eberly, JO; Crocker, FH; Indest, KJ Modélisation d'un biocapteur riboswitch synthétique à base d'aptamère sensible aux faibles Concentrations d'hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX). *PLoS ONE* 2020, 15, e0241664. [\[Référence croisée\]](#)
- Cordeiro, MF; Nunes, TRS; Bezerra, FG; Damasco, PKM; Silva, WAV; Ferreira, MRA; Magalhães, OMC; Soares, LAL; Cavalcanti, FMI; Pitta, MGR; et coll. Caractérisation phytochimique et activités biologiques de *Plectranthus barbatus* Andrews. *Braz. J. Biol.* 2021, 82, e236297. [\[Référence croisée\]](#)
- Heuer, C.; Bahnmann, J.; Scheper, T.; Segal, E. Ouvrir la voie pour vaincre la résistance aux médicaments antifongiques : pratiques actuelles et nouveaux développements pour des tests de sensibilité aux antifongiques rapides et fiables. *Petites méthodes* 2021, 5, 2100713. [\[CrossRef\]](#)
- Knoppers, T.; Beauchamp, E.; Dewar, K.; Kimmins, S.; Bourque, G.; Joly, Y.; Dupras, C. Les omiques de nos vies : pratiques et politiques des sociétés de tests épigénétiques et microbiologiques s'adressant directement aux consommateurs. *Nouveau Genet. Soc.* 2021, 40, 541-569. [\[Référence croisée\]](#)

25. Cheraghi-Shahi, S.; Dadmehr, M.; Korouzhdehi, B.; Tavassoli, A. Un nouveau biocapteur colorimétrique pour la détection sensible de l'aflatoxine médiée par une réaction enzymatique bactérienne dans des échantillons de safran. *Nanotechnology* 2021, 32, 505503. [\[CrossRef\]](#)
26. Nesakumar, N.; Lakshmanakumar, M.; Srinivasan, S.; Jayalatha, JBB; Balaguru-Rayappan, principes JBA et avancées récentes dans Biocapteurs pour la détection d'agents pathogènes. *ChimieSelect* 2021, 6, 10063-10091. [\[Référence croisée\]](#)
27. Hao, Z.; Chen, H.; Shi, X.; Tan, W.; Zhu, G. Fabrication de dispositifs d'analyse microfluidique sur papier et d'applications d'analyse de la salive. *Microfluide. Nanofluide.* 2021, 25, 80. [\[Réf. croisée\]](#)
28. Chang, CC-C.; Chen, C.-P.; Wu, TH.; Yang, CH.; Lin, C.-W.; Chen, C.-Y. Stratégies colorimétriques basées sur les nanoparticules d'or pour Applications de détection chimique et biologique. *Nanomatériaux* 2019, 9, 861. [\[CrossRef\]](#)
29. Cardoso, S.; Leitao, DC.; Dias, TM; Valadeiro, J.; Silva, MD; Chicharo, A.; Silvério, V.; Gaspar, J.; Freitas, PP Défis et tendances de l'intégration des capteurs magnétiques avec la microfluidique pour les applications biomédicales. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2017, 50, 213001. [\[Référence croisée\]](#)
30. Sarver, RW; Almy, DJ; Bergeron, ER; Fort, BF; Steiner, BA; Donofrio, R.; Lupo, AJ; Gray, RL; Sperry, AK Présentation des tests portables pour la détection des mycotoxines, des allergènes et la surveillance de l'assainissement. *J. AOAC Int.* 2021, 104, 39-48. [\[Référence croisée\]](#)
31. Mak, AC; Osterfeld, SJ; Yu, H.; Wang, SX; Davis, RW; Jejelowo, OA; Pourmand, N. Sensible à base magnétorésistive géante test immunologique pour la détection multiplex des mycotoxines. *Biosens. Bioelectron.* 2010, 25, 1635-1639. [\[Référence croisée\]](#)
32. Liao, J.; Li, H. Immunodipstick à flux latéral pour la détection visuelle de l'aflatoxine B1 dans les aliments à l'aide d'immuno-nanoparticules composées de un noyau en argent et une coque en or. *Microchim. Acta* 2010, 171, 289-295. [\[Référence croisée\]](#)
33. Tittlemier, SA; Cramer, B.; Dall'Asta, C.; DeRosa, MC; Lattanzio, VMT; Malone, R.; Maragos, C.; Stranska, M.; Sumarah, MW Développements dans l'analyse des mycotoxines : une mise à jour pour 2020-2021. *Mycotoxine mondiale J.* 2022, 15, 3–25. [\[Référence croisée\]](#)
34. Lu, W.; Wang, K.; Xiao, K.; Qin, W.; Hou, Y.; Xu, H.; Yan, X.; Chen, Y.; Cui, D.; He, J. Bandelette de test à flux latéral à base de nanobilles immunomagnétiques doubles pour la détection quantitative simultanée de l'antigène carcinoembryonnaire et de l'énolase spécifique des neurones. *Sci. Rapport* 2017, 7, 42414. [\[CrossRef\]](#)
35. Ngom, B.; Guo, Y.; Wang, X.; Bi, D. Développement et application de la technologie des bandelettes de test à flux latéral pour la détection des maladies infectieuses agents et contaminants chimiques: une revue. *Anal. Bioanal. Chimique.* 2010, 397, 1113-1135. [\[Référence croisée\]](#)
36. Sojinrin, T.; Liu, K.; Wang, K.; Cui, D.; Bryne, HJ; Curtin, JF; Tian, F. Développement de l'aflatoxine B1 conjuguée à des nanoparticules d'or Bandes antifongiques. *Int. J. Mol. Sci.* 2019, 20, 6260. [\[Réf. croisée\]](#)
37. Ji, Y.; Ren, M.; Li, Y.; Huang, Z.; Shu, M.; Yang, H.; Xiong, Y.; Xu, Y. Détection de l'aflatoxine B1 avec test immunochromatographique bandes : sensibilité du signal améliorée grâce à des nanofleurs dorées. *Talante* 2015, 142, 206-212. [\[Référence croisée\]](#)
38. Ouroussov, A.; Zherdev, AV; Dzantiev, BB Utilisation d'anticorps secondaires marqués aux nanoparticules d'or pour améliorer la sensibilité d'un dosage immunochromatographique pour l'aflatoxine B1. *Microchim. Acta* 2014, 181, 1939-1946. [\[Référence croisée\]](#)
39. Di-Nardo, F.; Alladio, E.; Baggiani, C.; Cavallera, S.; Giovannoli, C.; Spano, G.; Anfossi, L. Test immunologique à flux latéral codé par couleur pour la détection simultanée de l'aflatoxine B1 et des fumonisines de type B dans une seule ligne de test. *Talante* 2019, 192, 288-294. [\[Référence croisée\]](#)
40. Xiulan, S.; Xiaolian, Z.; Jian, T.; Xiaohong, G.; juin, Z.; Chu, FS Développement d'un test immunochromatographique pour la détection d'aflatoxine B1 dans les aliments. *Contrôle alimentaire* 2006, 17, 256-262. [\[Référence croisée\]](#)
41. Liu, B.-H.; Hsu, Y.-T.; Lu, CC-C.; Yu, F.-Y. Détection de l'aflatoxine B1 dans les denrées alimentaires et les aliments pour animaux à l'aide d'un test immuno-enzymatique rapide et sensible et d'une bande immunochromatographique de nanoparticules d'or. *Contrôle alimentaire* 2013, 30, 184-189. [\[Référence croisée\]](#)
42. Zheng, Q.; Wu, H.; Jiang, H.; Yang, J.; Gao, Y. Développement d'un test immunochromatographique fluorescent basé sur un smartphone Lecteur de bandes. *Capteurs* 2020, 20, 4521. [\[CrossRef\]](#)
43. Li, X.; Yang, F.; Wong, JXH; Yu, système intégré de puce d'application pour smartphone HZ pour la quantification colorimétrique des aflatoxines au niveau des parties par milliard sur site. *Anal. Chimique.* 2017, 89, 8908-8916. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
44. Lee, S.; Kim, G.; Moon, J. Amélioration des performances du test immunologique à flux latéral à un point pour l'aflatoxine B1 en utilisant un système de lecture sur smartphone. *Capteurs* 2013, 13, 5109-5116. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
45. Kawashima, LM; Vieira, AP; Soares, LMV Fumonisine B1 et ochratoxine A dans les bières fabriquées au Brésil. *Science alimentaire. Technologie.* 2007, 27, 317-323. [\[Référence croisée\]](#)
46. Wang, Z.; Li, H.; Li, C.; Yu, Q.; Shen, J.; De-Saeger, S. Développement et application d'un test immunochromatographique quantitatif basé sur la fluorescence pour la fumonisine B1 dans le maïs. *J. Agric. Chimie alimentaire.* 2014, 62, 6294-6298. [\[Référence croisée\]](#)
47. Ren, W.; Xu, Y.; Huang, Z.; Li, Y.; Tu, Z.; Zou, L.; Lui, Q.; Fu, J.; Liu, S.; Hammock, BD Bandelette immunochromatographique à base d'anticorps à fragment variable à chaîne unique pour la détection rapide de la fumonisine B1 dans les échantillons de maïs. *Chimie alimentaire.* 2020, 319, 126546. [\[Référence croisée\]](#)
48. Venkataramana, M.; Navya, K.; Chandranayaka, S.; Priyanka, SR; Murali, HS; Batra, HV Développement et validation d'un test immunochromatographique pour la détection rapide de fumonisine B1 à partir d'échantillons de céréales. *J. Food Sci. Technologie.* 2014, 51, 1920-1928. [\[Référence croisée\]](#)
49. Tang, X.; Lèvre; Zhang, Q.; Zhang, Z.; Zhang, W.; Jiang, J. Test immunochromatographique par fluorescence résolu dans le temps développé à l'aide de deux nanocorps idiotypiques pour la détection rapide, quantitative et simultanée de l'aflatoxine et de la zéaralénone dans le maïs et ses produits. *Anal. Chimique.* 2017, 89, 11520-11528. [\[Référence croisée\]](#)
50. Hong, X.; Mao, Y.; Yang, C.; Liu, Z.; Li, M.; Du, D. Contamination de la Zéaralénone en provenance de Chine en 2019 par un visuel et numérisé Test immunochromatographique. *Toxines* 2020, 12, 521. [\[CrossRef\]](#)

51. Wang, D. ; Zhang, Z. ; Zhang, Q. ; Wang, Z. ; Zhang, W. ; Yu, L. ; Li, H. ; Jiang, J. ; Li, P. Test immunochromatographique rapide et sensible à double étiquette pour la détection de la zéaralénone dans les céréales. *Électrophorèse* 2018, 39, 2125-2130. [\[Référence croisée\]](#)
52. Zhang, X. ; Lui, K. ; Croc, Y. ; Cao, T. ; Paudyal, N. ; Zhang, XF ; Chanson, HH ; Li, XL ; Fang, WH Test immunochromatographique à double flux pour la détection quantitative rapide et simultanée de l'ochratoxine A et de la zéaralénone dans des échantillons de maïs, de blé et d'aliments pour animaux. J. Université du Zhejiang. *Sci. B* 2018, 19, 871-883. [\[Référence croisée\]](#)
53. Soleil, Y. ; Xing, G. ; Yang, J. ; Wang, F. ; Deng, R. ; Zhang, G. ; Hu, X. ; Zhang, Y. Développement d'une bandelette de test immunochromatographique pour la détection qualitative et quantitative simultanée de l'ochratoxine A et de la zéaralénone dans les céréales. *J. Sci. Agriculture alimentaire*. 2016, 96, 3673-3678. [\[Référence croisée\]](#)
54. Qie, Z. ; Shi, J. ; Yan, W. ; Gao, Z. ; Meng, W. ; Xiao, R. ; Wang, S. Test immunochromatographique pour la toxine T-2 basé sur la luminescence perles à points quantiques. *RSC Adv*. 2019, 9, 38697-38702. [\[Référence croisée\]](#)
55. Ourousov, AE ; Petrakova, AV ; Bartosh, AV ; Gubaydullina, MK ; Zherdev, AV ; Dzantiev, BB Test immunochromatographique de Toxine T-2 à l'aide d'anticorps anti-espèces marqués. *Appl. Biochimie*. 2017, 53, 594-599. [\[Référence croisée\]](#)
56. Petrakova, AV ; Ourousov, AE ; Vozniak, MV ; Zherdev, AV ; Dzantiev, BB Système de test immunochromatographique pour la détection de la toxine T-2. *Appl. Biochimie*. 2015, 51, 688-694. [\[Référence croisée\]](#)
57. Petrakova, AV ; Ourousov, AE ; Gubaydullina, MK ; Bartosh, AV ; Zherdev, AV ; Dzantiev, BB Les anticorps « externes » comme outil le plus simple pour les tests immunochromatographiques sensibles. *Talante* 2017, 175, 77-81. [\[Référence croisée\]](#)
58. Zhang, X. ; Yu, X. ; Wen, K. ; Li, C. ; Mujtaba-Mari, G. ; Jiang, H. ; Shi, W. ; Shen, J. ; Wang, Z. Tests immunologiques à flux latéral multiplex basés sur des nanoparticules de carbone amorphes pour la détection de trois mycotoxines de Fusarium dans le maïs. *J. Agric. Chimie alimentaire*. 2017, 65, 8063-8071. [\[Référence croisée\]](#)
59. Wang, Z. ; Duan, N. ; Bon, X. ; Wu, S. Biocapteur aptamère électrochimiluminescent pour la détermination de l'ochratoxine A sur une électrode en or modifiée par des nanoparticules d'or utilisant du N-(aminobutyl)-N-éthylisoluminol comme marqueur luminescent. *Anal. Bioanal. Chimique*. 2010, 398, 2125-2132. [\[Référence croisée\]](#)
60. Nil, SH ; Baskar, V. ; Selvaraj, D. ; Nil, A. ; Xiao, J. ; Kai, G. Nanotechnologies dans les sciences alimentaires : applications, tendances récentes et perspectives d'avenir. *Nano-Micro Lett.* 2020, 12, 45. [\[Réf. croisée\]](#)
61. Liu, K. ; Lui, Z. ; Byrne, HJ ; Curtin, JF ; Tian, F. Étude du rôle de la forme et de la taille des nanoparticules d'or dans leur toxicité pour Champignons. *Int. J. Environ. Rés. Santé publique* 2018, 15, 998. [\[CrossRef\]](#)
62. Tian, F. ; Clift, MJ ; Casey, A. ; Del-Pino, P. ; Pélaez, B. ; Condé, J. ; Byrne, HJ ; Rothen-Rutishauser, B. ; Estrada, G. ; Fuente, JM ; et coll. Étudier le rôle de la forme sur l'impact biologique des nanoparticules d'or in vitro. *Nanomédecine* 2015, 10, 2643-2657. [\[Référence croisée\]](#)
63. Szulc, J. ; Kolodziej, A. ; Ruman, T. Spectrométrie de masse par désorption/ionisation laser assistée par surface de cible améliorée par des nanoparticules d'argent/argent/or - Les nouvelles méthodes pour une évaluation de la concentration de mycotoxines sur les matériaux de construction. *Toxines* 2021, 13, 45. [\[CrossRef\]](#)
64. Anfossi, L. ; Di-Nardo, F. ; Cavallera, S. ; Giovannoli, C. ; Spano, G. ; Speranskaia, ES ; Goryacheva, IY ; Baggiani, C. Un test immunologique à flux latéral pour la détermination simple des mycotoxines de fumonisine basé sur l'extinction de la fluorescence des points quantiques CdSe/ZnS par des nanoparticules d'or et d'argent. *Microchim. Acta* 2018, 185, 94. [\[CrossRef\]](#)
65. Asharani, PV ; Lianwu, Y. ; Gong, Z. ; Valiyaveetil, S. Comparaison de la toxicité des nanoparticules d'argent, d'or et de platine dans développer des embryons de poisson zèbre. *Nanotoxicologie* 2011, 5, 43-54. [\[Référence croisée\]](#)
66. Siddiqi, KS ; Husen, A. ; Rao, RAK Une revue sur la biosynthèse des nanoparticules d'argent et leurs propriétés biocides. *J. Nanobiotechnologie* . 2018, 16, 14. [\[Réf. croisée\]](#)
67. Ahamed, M. ; Karns, M. ; Goodson, M. ; Rowe, J. ; Hussein, SM ; Schlager, JJ ; Hong, Y. Réponse aux dommages de l'ADN à différentes chimies de surface des nanoparticules d'argent dans les cellules de mammifères. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2008, 233, 404-410. [\[Référence croisée\]](#)
68. Armbruster, DA ; Pry, T. Limite de blanc, limite de détection et limite de quantification. *Clin. Biochimie. Rév.* 2008, 29, S49-S52.
69. Liu, Y. ; Zhan, L. ; Qin, Z. ; Saccrison, J. ; Bischof, JC Tests à flux latéral ultrasensibles et hautement spécifiques pour le diagnostic au point de service . *ACS Nano* 2021, 15, 3593-3611. [\[Référence croisée\]](#)
70. Soh, JH ; Chan, HM ; Ying, JY Stratégies pour développer des tests à flux latéral sensibles et spécifiques basés sur des nanoparticules, comme appareil de diagnostic sur le lieu de soins. *Nano aujourd'hui* 2020, 30, 100831. [\[CrossRef\]](#)
71. Nguyen, V.-T. ; Chansons. ; Parc, S. ; Joo, C. Progrès récents dans les méthodes de détection à haute sensibilité pour les analyses à flux latéral sur papier. *Biosens. Bioélectron.* 2020, 152, 112015. [\[Réf. croisée\]](#)
72. Bishop, JD ; Hsieh, HV ; Gaspérino, DJ ; Weigl, BH Amélioration de la sensibilité dans les tests à flux latéral : une perspective systémique. *Puce de laboratoire* 2019, 19, 2486-2499. [\[Référence croisée\]](#)
73. Nardo, F. ; Chiarello, M. ; Cavallera, S. ; Baggiani, C. ; Anfossi, L. Dix ans d'applications des techniques de dosage immunologique à flux latéral : Tendances, défis et perspectives d'avenir. *Capteurs* 2021, 21, 5185. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)