

Évaluation quantitative des risques sanitaires associés à l'ingestion d'éléments traces métalliques contenus dans le miel multifloral frais produit dans la Commune cotonnière de Banikoara, Bénin

Yélian A. Hervé KINDJI^{1*} et Elisabeth YEHOUEOU AZÉHOUN PAZOU²

¹ Université d'Abomey-Calavi (UAC), Ecole Doctorale Pluridisciplinaire « Espaces, Cultures et Développement » (EDP-ECD), Faculté des Sciences Humaines et Sociales (FASHS), Laboratoire Pierre PAGNEY " Climat, Eau, Environnement et Dynamique des Ecosystèmes " (LACEEDE), 01BP526 Cotonou, Bénin

² Université d'Abomey-Calavi (UAC), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), Département du Génie de l'Environnement, Laboratoire de Recherches et d'Etude en Biologie Appliquée (LARBA), 01BP 526 Cotonou, Bénin

(Reçu le 30 Octobre 2024 ; Accepté le 18 Décembre 2024)

* Correspondance, courriel : kindjiherv@gmail.com

Résumé

Cette étude a pour objectif de quantifier l'arsenic, le cadmium, le mercure et le plomb dans le miel polyfloral frais produit dans la Commune cotonnière de Banikoara puis d'évaluer le risque sanitaire lié à son ingestion. A cet effet, en 2022 et 2023, vingt-quatre (24) échantillons de miel ont été prélevés au cours des diverses saisons apicoles dans différents ruchers et types de ruches dans les localités de Founougo et Kérérou puis ensuite analysés par spectrométrie d'absorption atomique après un processus de digestion sèche. A l'exception du mercure, l'arsenic, le cadmium et le plomb ont été détectés dans tous les échantillons. Pour ces trois éléments traces métalliques (ETM) quantifiés, les valeurs des paramètres d'évaluation quantitative du risque sanitaire qui ont été calculés (quotient et indice de danger, excès de risque individuel et impact sanitaire) étaient en deçà des limites maximales fixées par les instruments normatifs internationaux. Ainsi, QD et ID étaient inférieurs à 1 puis $ERI < 1,00E-5$. Ce miel ne présentait donc aucun risque sanitaire potentiel pour tout consommateur. Néanmoins, des mesures de surveillances périodiques, permanentes et coercitives doivent être mises en place par les pouvoirs publics.

Mots-clés : *ruche, abeilles mellifères, métaux lourds, spectrométrie d'absorption atomique, quotient de danger.*

Abstract

Quantitative assessment of the health risks associated with the ingestion of trace metal elements contained in fresh multifloral honey produced in the Banikoara cotton-growing commune, Benin

The aim of this study is to quantify arsenic, cadmium, mercury and lead in fresh polyfloral honey produced in the Banikoara cotton-growing commune, and then to assess the health risk associated with its ingestion. To this end, in 2022 and 2023, twenty-four (24) honey samples were taken during the various beekeeping seasons from different apiaries and hive types in the localities of Founougo and Kérérou, and then analyzed

by atomic absorption spectrometry after a dry digestion process. With the exception of mercury, arsenic, cadmium and lead were detected in all samples. For the three heavy metals quantified, the values of the quantitative health risk assessment parameters calculated (hazard quotient and index, excess individual risk and health impact) were below the maximum limits set by international normative instruments. QD and ID were below 1, and ERI < 1.00E-5. This honey therefore presented no potential health risk for any consumer. Nevertheless, periodic, permanent and coercive monitoring measures need to be put in place by the public authorities.

Keywords : *hive, honey bees, heavy metals, atomic absorption spectrometry, hazard quotient.*

1. Introduction

Le miel est un aliment naturel sucré, fruit d'un long processus conduit par l'abeille mellifère à partir généralement du nectar des fleurs et dans une moindre mesure du miellat auquel l'abeille ajoute plusieurs enzymes de son système digestif [1]. Il contient jusqu'à 200 substances dont l'eau, le glucose, le fructose, le saccharose, des sels minéraux, des vitamines, des antioxydants, etc. [2]. Mais il arrive souvent qu'en dehors de ces constituants normaux, le miel soit souillé par divers contaminants bactériologiques, physiques ou chimiques dont les ETM [3]. Au Bénin, le miel est très consommé et c'est celui produit dans les départements du Nord qui est plus convoité par les populations béninoises. Mais il se fait que tous les quatre départements du septentrion qui sont de grands producteurs de miel [4], sont primordialement producteurs de coton conventionnel très vorace en engrais minéraux phosphatés et en pesticides chimiques de synthèse. L'Alibori, l'un de ces départements septentrionaux est le bastion cotonnier du pays avec la Commune de Banikoara comme chef de file pour la culture de ce premier produit de rente [5]. Des recherches scientifiques conduites dans ladite Commune ont révélé une contamination des sols, des sédiments, de l'eau de boisson, des eaux de surface, des produits halieutiques, des cultures maraîchères et vivrières par des résidus de pesticides chimiques et des ETM [6]. Les quelques rares études menées spécifiquement sur le miel au Bénin ont porté sur ses divers usages [7], sur ses caractéristiques physico-chimiques [8], sur sa contamination par des pesticides chimiques de synthèse [9], sur son analyse pollinique et sa caractérisation phytogéographique [10]. La littérature scientifique sur la teneur en ETM du miel et le risque sanitaire qui y est associé est limitée alors que ces dernières années, la sécurité et la qualité du miel puis de ses produits dérivés sont devenues un enjeu international [11]. C'est dans ce contexte que la recherche a été menée aux fins de déterminer les niveaux d'arsenic, de cadmium, de mercure et de plomb dans le miel de la Commune de Banikoara puis évaluer le risque sanitaire qu'ils représentent pour les consommateurs.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation succincte du milieu d'étude

L'étude s'est déroulée à Banikoara qui est l'une des 27 Communes du Nord Bénin. Elle est située entre 11°02' et 11°34' Latitude Nord puis 2°05' et 2°46' Longitude Est avec 10 arrondissements subdivisés en 112 villages administratifs (*Figure 1*).

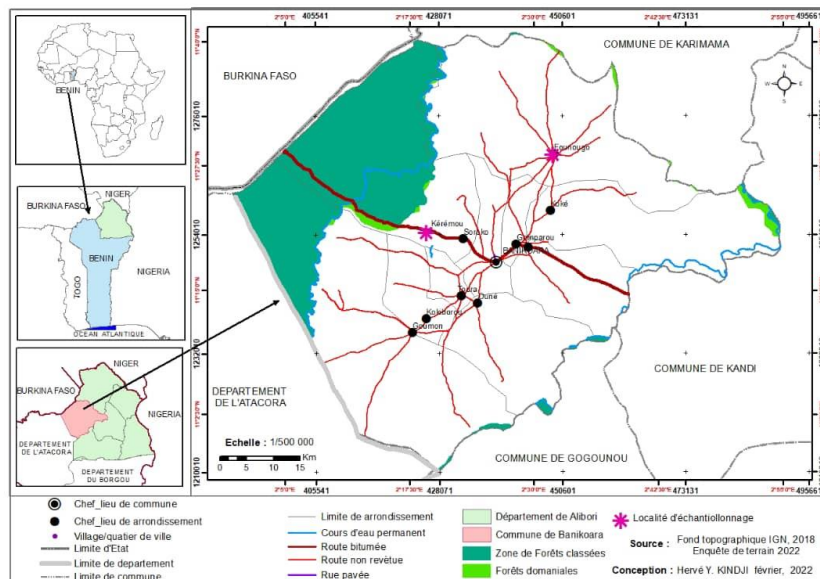


Figure 1 : Localités d'échantillonnage dans la zone d'étude

La Commune de Banikoara couvre une superficie de 4383 km² dont environ 49 % de terres cultivables et 50 % d'aires protégées. Le relief est une péninsule avec la présence de différents types de sols. Le climat est de type sahélo-soudanien avec une saison pluvieuse et une saison sèche. Tous ces atouts naturels sont favorables à l'agriculture et au développement de formations naturelles de types savane arbustive à savane arborée à dominance d'espèces mellifères telles que *Parkia biglobosa*, *Vitellaria paradoxa*, *Lannea microcarpa*, *Tamarindus indica* puis moyennement *Adansonia digitata* L. butinées par les abeilles pour la production du miel [12]. La principale activité génératrice de revenus pratiquée par les populations majoritairement Bariba est l'agriculture avec en tête la culture du coton conventionnel [13] qui nécessite l'utilisation d'intrants chimiques de synthèse homologués ou non. Depuis 2008, la Commune de Banikoara est en tête dans la production du coton conventionnel avec une production qui s'établit à 142704 tonnes en 2017 contre 116 055 tonnes en 2016 [14]. L'usage excessif des intrants chimiques pour la cotonculture est source de contaminations des sols, des eaux, des sédiments, des poissons, du miel, etc. [9]. Outre l'agriculture, d'autres activités secondaires comme l'élevage, la pêche et l'apiculture y sont pratiquées.

2-2. Matériel

Pour mener l'étude, différents matériels ont été utilisés :

- **Matériel biologique** : les échantillons de miel frais multi floral récoltés dans deux différents ruchers et à différentes périodes apicoles en 2022 et 2023 ;
- **Matériels de prélèvement des échantillons de miel poly floral** : combinaison intégrale ; gants et bottes ; enfumoir Dadant 10" ; brosse à abeilles ; couteau à désoperculer ; bouteilles en polyéthylène d'une capacité de 1 litre.
- **Matériels, équipements et appareillage de laboratoire** : réfrigérateur ; spectrophotomètre d'absorption atomique de type AAS THERMO ORION SOLAAR S2 ; agitateur-homogénéisateur ; balance analytique de résolution 0,1 mg ; verrerie usuelle.
- **Réactifs et solvants** : eau déionisée ; acide chlorhydrique 37 % de qualité pour analyse ; acide nitrique (HNO₃) de concentration ≥ 65 % (Suprapur ou équivalent) ; [(NH₄) H₂PO₄] ; [Mg (NO₃)₂, 6H₂O] ; solution étalon de plomb, de cadmium, de mercure et d'arsenic prête à l'emploi à 1 g.l⁻¹.

2-3. Méthodes

2-3-1. Estimation de la consommation journalière de miel au Bénin

Les données relatives à la quantité journalière de miel consommé par personne au Bénin faisaient défaut dans la littérature. De ce fait, les quantités de miel ingéré ont été déterminées à partir d'une enquête spécifique sur les habitudes de consommation du miel dans 9 Communes dont 3 par région (méridionale, centrale et septentrionale). Cette enquête avait ressorti que les adultes consommaient en moyenne mensuellement 0,53 litre de miel soit 750 g ce qui équivaut à une consommation journalière moyenne de 25 g. Par contre pour les enfants, c'est environ 12 g de miel qui sont ingérés en moyenne chaque jour. Ce sont ces valeurs qui ont été considérées dans le calcul de la dose journalière d'exposition.

2-3-2. Choix des ruchers et ruches de collecte des échantillons de miels

Le rucher le plus proche et celui le plus éloigné des exploitations cotonnières ont été retenus pour le prélèvement des échantillons de miel frais. L'application *DISTANCEMETRE* du smartphone TECNO CAMON 16S modèle TECNO CD6j a été utilisée. Ainsi, le rucher le moins distant (rucher en plein champ cotonnier) d'un champ de coton conventionnel a été identifié à Founougo (arrondissement de Founougo) tandis que le rucher le plus éloigné d'une exploitation cotonnière (distance > 3 km) a été situé à Kérékou (arrondissement de Soroko). Une ruche colonisée de chacun des trois types utilisés dans la Commune de Banikoara a été choisie au hasard pour le prélèvement des échantillons de miel frais.

2-3-3. Périodes et Nombre de prélèvements des échantillons

Chaque année dans la Commune de Banikoara, la récolte du miel par les apiculteurs se fait à deux moments essentiels : en mars pour la grande récolte et en novembre pour la petite. Sur chacun des deux ruchers retenus, 3 prélèvements ont été effectués à chaque période (mars et novembre). Ainsi donc, pendant les deux années (2022 et 2023) qu'ont duré la collecte des échantillons, 12 échantillons de miel ont été récoltés sur chaque site soit au total 24 échantillons pour l'ensemble des deux ruchers.

2-3-4. Mode de récolte, codification et conservation des échantillons

Pour chacun des trois types de ruches choisies au hasard sur un rucher, l'apiculteur vêtu de l'accoutrement de travail puis équipé, a calmé les abeilles, ouvert la ruche et retiré 3 rayons de miel operculés à 80 % au moins. Ces rayons débarrassés des ouvrières et désoperculés ont été directement pressés dans des bouteilles en polyéthylène d'une capacité de 1 litre (ce qui équivaut à environ 1,42 kg de miel frais). Un code de trois lettres a permis d'identifier chaque bouteille. Les échantillons ainsi codifiés ont été conservés dans une glacière avec des glaçons puis transportés au laboratoire IRGIB-AFRICA à Cotonou où ils ont été stockés dans un réfrigérateur à une température de -20°C jusqu'à l'analyse.

2-3-5. Détection et quantification des ETM dans le miel

La méthode utilisée par IRGIB-AFRICA pour détecter et quantifier ces éléments traces dans la présente étude était la spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA) au four graphite qui présente l'avantage d'une analyse multi-éléments [15]. Elle se déroule en deux étapes : la digestion sèche [16] et le dosage des échantillons.

2-3-6. Assurance qualité de la démarche d'analyse du laboratoire

Le spectrophotomètre a été calibré conformément aux instructions du manuel avec une série de solutions standard fournies par Merck (Allemagne). Pour doser chaque métal, on faisait d'abord passer à l'appareil les solutions étalons avant de faire passer le filtrat de chaque échantillon. Les valeurs de concentration ne devaient pas s'écarter des limites fixées sur les cartes de contrôle. Dans le cas échéant, le problème éventuel était identifié, on y remédiait et recommençait l'étalonnage. Un blanc a également été préparé dans les mêmes conditions que les échantillons analysés. Cet essai à blanc permettait de se rassurer qu'il n'y avait pas de contamination. En outre, afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats, des dosages multiples ont été réalisés sur un même échantillon (les doublons). Il faut ajouter à tout ceci, l'utilisation de réactifs de haute pureté.

2-3-7. Analyses statistiques

Les statistiques descriptives ont été réalisées dans le tableur Microsoft Excel 2016. Les statistiques inférentielles ont fait intervenir les tests paramétriques ANOVA et PEARSON respectivement pour la comparaison et la corrélation des concentrations en ETM dans les échantillons de miel. Pour mettre en exergue la relation existante entre la présence des métaux et les périodes de collectes des échantillons de miel, des analyses factorielles des correspondances (AFC) ont été réalisées. Le logiciel R a servi à tout cela. Le test de signification pour tous les tests était fixé à $p < 0,05$.

2-3-8. Évaluation quantitative des risques sanitaires liés à l'ingestion des éléments traces contenus dans le miel

L'étude s'est basée sur le modèle d'évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) en quatre principales étapes [17] :

- *Etape 1 : Identification des dangers*

Tenant compte des résultats de travaux antérieurs conduits sur les métaux lourds à Banikoara [6] et des degrés de nocivité des éléments traces métalliques (ETM), l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd), le Mercure (Hg) et le Plomb (Pb) ont été retenus pour être recherchés et quantifiés au laboratoire dans les échantillons de miel collectés.

- *Etape 2 : Évaluation de la relation dose-réponse*

La relation dose-réponse est représentée par la Valeur Toxicologique orale de Référence (VTRor) dont la nature diffère selon l'effet (à seuil ou sans seuil). Les VTRor (en mg/kg/j) retenues pour les métaux étudiés dans cette étude sont de $3,00E-04$; $1,00E-03$; $2,00E-03$; $3,50E-03$ respectivement pour l'As, le Cd, le Hg et le Pb [17].

- *Etape 3 : Évaluation de l'exposition de la population*

L'Équation 1 a permis de calculer la Dose Journalière d'Exposition chronique par voie orale pour chacun des ETM quantifiés dans les échantillons [18] :

$$DJE = \frac{C_i \times Q \times F_{a,ing} \times FE}{PC_m} \tag{1}$$

avec, DJE : Dose Journalière d'Exposition aux ETM en étude (mg/kg/j) ; C_i : Concentration maximale du métal *i* mesurée dans les miels échantillonnés (mg/kg) ; *Q* : Quantité de miel ingéré par personne par jour (kg/j) ; $F_{a,ing}$: fraction du contaminant ingéré et réellement absorbé par jour (mg/kg). La fraction de contaminants réellement absorbés a été prise pour 100 % des fractions ingérées ; FE : Fréquence d'Exposition au contaminant (jours/année). Il a été considéré ici que le miel était consommé chaque jour et une fois par jour sur tous les jours d'une année civile donc sur 365 jours/365 jours (FE = 1) ; PC_m : Poids Corporel moyen de la cible (kg). Les poids corporels moyens de 28 kg pour les enfants de 18 mois à 18 ans et de 60 kg pour les adultes ont été considérés [19].

- **Etape 4 : Caractérisation du risque sanitaire**

Il a été procédé à cette étape à une évaluation des risques sanitaires chroniques associés à l'ingestion de miel pour les effets à seuil d'une part et les effets sans seuil d'autre part.

- **Etape 4-1 : Risques sanitaires pour les ETM à seuil de dose**

La caractérisation du risque sanitaire d'une exposition chronique par voie orale aux ETM ayant des effets à seuil a été basée sur le calcul du Quotient de Danger (QD) et l'Indice de Danger (ID).

- **Quotient (Ratio) de Danger (QD ou RD)**

Le QD a été calculé pour chacun des ETM selon l'Équation 2 [18].

$$QD = \frac{DJE}{VTR_{Or}} \quad (2)$$

où, QD est le Quotient de Danger (adimensionnel); DJE est la Dose Journalière d'Exposition (mg/kg/j); VTR_{Or} est la valeur toxicologique orale de référence (mg/kg/j).

Interprétation du résultat du QD : si QD est < 1, survenue d'effet toxique peu probable. Par contre, si QD > 1, des effets sont susceptibles de se produire [18]. Ce QD ne renseigne pas sur l'effet résultant de l'exposition à un mélange de substances d'où le recours à l'indice de danger.

- **Indice de Danger (ID)**

L'ID est la somme algébrique des QD des quatre ETM étudiés. Elle est matérialisée par la Relation 3 [18] :

$$ID = QD_{total} = ID_{(arsenic)} + ID_{(cadmium)} + ID_{(mercure)} + ID_{(plomb)} \quad (3)$$

Interprétation des valeurs de l'ID : Si ID < 1 alors pas d'effets néfastes non cancérigène mais si ID ≥ 1 donc il y a une probabilité d'effets indésirables [18]. Si ID > 10, il y a un impact chronique grave sur la santé [20].

- **Etape 4-2 : Risques sanitaires pour les ETM sans seuil de dose**

La caractérisation des risques sanitaires chroniques par voie orale pour les ETM sans seuil de dose s'est faite par le calcul de l'ERI et l'IS.

- **Excès de Risque Individuel (ERI)**

L'ERI est appréhendé par la Formule 4 [21].

$$ERI = DJE \times \frac{T_e}{T_{vie}} \times ERU_0 \quad (4)$$

avec, ERI = Excès de Risque Individuel (sans unité); DJE = Dose Journalière Estimée (mg/kg/j); T_e = Durée totale de l'exposition de l'individu; T_{vie} = Durée de la vie entière. Ici on suppose que T_e = T_{vie}; ERU₀ = Excès de Risque Unitaire par voie orale (mg/kg_{p.o}/j)⁻¹. Les valeurs de l'ERU₀ utilisées dans les calculs de cette étude sont 1,50E+00 pour l'As [22], 3,80E-01 pour le Cd [23], 8,50E-03 pour le Pb [24]. Aucune ERU₀ n'a été retenue pour le Hg qui n'est considérée cancérigène que par inhalation. Interprétation de l'ERI : ERI < 10⁻⁵ = risque acceptable; ERI > 10⁻⁵ = risque inacceptable [25].

- **Impact Sanitaire (IS) ou Excès de Risque Collectif (ERC)**

L'IS se calcule par la Formule 5 [21] :

$$IS = N \times ERI \quad (5)$$

où, ERI est l'excès de risque individuel; N la taille de la population considérée. Ici N = 12 314 650 habitants [26].

3. Résultats et discussion

3-1. Teneurs moyennes des éléments traces détectés

Le **Tableau 1** a révélé que trois ETM sur les quatre recherchés ont été décelés et quantifiés dans les 24 échantillons de miel de Banikoara analysés entre 2022 et 2023. Pour tous les ETM quantifiés (As, Cd, Pb), les concentrations moyennes calculées étaient légèrement supérieures dans les échantillons de miels récoltés en novembre (petite récolte) que dans ceux de mars (grande récolte) et ceci quel que soit le rucher de récolte. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le miel récolté pendant la petite miellée en novembre fait immédiatement suite à la campagne cotonnière qui est un moment d'utilisation intense et généralisée des intrants chimiques de synthèse qui peut être transportés par les abeilles ou le vent dans la ruche. Il a été également remarqué que l'arsenic a présenté la plus forte concentration moyenne ($0,008 \pm 0,002$ mg/kg) dans des échantillons prélevés en novembre à Founougo tandis que la plus faible valeur moyenne ($0,0003 \pm 0,0$ mg/kg) a été notée avec le cadmium dans les prélèvements de mars à Kérékou. L'ordre croissant des concentrations moyennes mesurées dans tous les échantillons étaient donc Cadmium < Plomb < Arsenic.

3-1-1. Concentration en arsenic proche de la norme Béninoise

La concentration moyenne en arsenic des miels de toutes les récoltes des deux années de prélèvement était de $0,006 \pm 0,002$ mg/kg (**Tableau 1**). Cette valeur était pratiquement égale à celle autorisée dans la norme du Bénin (0,007 mg/kg). Les niveaux d'arsenic obtenus étaient légèrement moins élevés que ceux trouvés en Croatie pour le miel multifloral avec un taux moyen de 0,0095 mg/kg [27]. Cependant, de très fortes teneurs en arsenic mesurant 1,24 à 1,49 mg/kg ont été trouvées dans des échantillons de miel en Slovénie [28]. Mais les résultats trouvés ici étaient contraires à ceux obtenus dans les miels de Wallonie pour lesquels aucune contamination n'a été détectée dans 31 échantillons de miels prélevés et analysés [29]. L'une des hypothèses formulées dans l'étude pour expliquer ces absences d'arsenic ou d'autres métaux lourds dans le miel était qu'il fut possible qu'au cours du processus de sa fabrication à partir du nectar, les abeilles retiennent les particules polluantes dans leur tractus intestinal (détoxification ou effet de filtre), réduisant ainsi la concentration du polluant dans le miel. C'est une hypothèse souvent retenue pour expliquer les faibles teneurs de divers contaminants dans le miel en comparaison des autres matrices apicoles que sont l'abeille, le pollen, la cire, le pain d'abeilles et la gelée royale.

3-1-2. Faible concentration en plomb du miel

La concentration moyenne en plomb dans le miel de toutes les récoltes des différentes miellées des deux années 2022 et 2023 était de $0,003 \pm 0,002$ mg/kg (**Tableau 1**), ce qui faisait environ 50 % de la teneur maximale autorisée dans le miel au Bénin (0,007 mg/kg). Cette valeur moyenne était à peu près 15 fois inférieure à celle moyenne (0,047 mg/kg) des échantillons prélevés et analysés dans une étude réalisée en 2008 et 2009 sur quelques ruchers de l'ouest de la France [30]. Dans ladite étude, il a été observé que le miel était moins contaminé par le plomb et les autres métaux lourds que les autres matrices apicoles et que la concentration en plomb pouvait être liée à l'environnement du rucher, en particulier la proximité de routes, de sites industriels ou urbanisés. Dans les miels algériens, une valeur moyenne estimée à 0,22 mg/kg a été trouvée [31], ce qui était 73 fois supérieure à celle des miels de Banikoara. D'autres valeurs encore largement supérieures (14 mg/kg pour le miel d'orange ; 15,5 mg/kg pour le miel de sésame et 19 mg/kg pour le miel de trèfle) ont été quantifiées dans les miels de différentes régions mellifères en Egypte [32]. Contrairement à la présente étude où du plomb quoiqu'en faible quantité était mesurée dans le miel, aucune contamination de cet ETM n'a été relevée en Wallonie [29]. Outre les origines naturelles qu'on connaît aux ETM en général, les résidus de plomb enregistrés dans les échantillons de miel à Banikoara pourraient émaner de mauvaises

pratiques agricoles consistant à l'utilisation intensive et abusive d'engrais minéraux phosphatés, de pesticides chimiques de synthèse dans la cotonculture puis la culture des produits vivriers et le maraîchage de contre saison [33]. De nombreux travaux de recherche ont démontré que la présence des métaux lourds dans les sols notamment ceux agricoles était en grande partie liée à l'usage des pesticides et engrais chimiques phosphatés [34]. En effet, les ETM comme le plomb, retrouvés dans les engrais chimiques, sont accumulés dans les sols suite à la fertilisation, l'irrigation et l'application de plusieurs sortes de pesticides [35]. Ils peuvent y persister ou seront disponibles, absorbés par les plantes grâce à leurs systèmes racinaires surtout des plantes mellifères [36]. Le plomb par ce mécanisme de transfert ou migration engrais/pesticide-sol-plante pourrait se retrouver dans le nectar puis dans le miel qui en est issu. Il faut néanmoins ajouter que l'absorption des ETM par les plantes dépend de leur concentration dans la solution du sol et de leurs formes physico-chimiques, c'est-à-dire leur spéciation, biodisponibilité et mobilité dans le sol [37]. Indépendamment de ces facteurs intrinsèquement liés à l'ETM, le niveau d'accumulation dépend aussi de l'espèce végétale. Certaines plantes comme la *Lactuca sativa L.*, *Cymbopogon citratus*, *Sedum alfredii* et bien d'autres visitées par les abeilles sont des hyperaccumulateurs de métaux lourds. Le plomb trouvé dans les échantillons de miel de la Commune de Banikoara pourrait aussi être la conséquence de l'utilisation au cours du processus de production du miel (notamment lors de l'extraction), d'outils de fabrication artisanale confectionnés avec des matériaux qui ne sont pas forcément de qualité alimentaire (presse artisanale manuelle et autres ustensiles utilisés). Cette hypothèse est soutenue par une étude précédente dans laquelle des résidus de métaux lourds (Pb, Fe) de concentrations très supérieures aux normes homologuées ont été trouvés dans du beurre de karité et les auteurs ont attribué cela à la qualité des outils de transformation artisanale utilisés [38].

3-1-3. Cadmium présent à très faible teneur dans le miel

Le cadmium, troisième molécule détectée et mesurée, l'a été à une teneur moyenne de $0,0003 \pm 0$ mg/kg (**Tableau 1**) qui est environ 7 fois inférieure aux recommandations pour cet ETM dans le miel du Bénin. Cette concentration moyenne est de loin (16 fois) inférieure à celle moyenne de 0.005 mg/kg notée lors de l'examen de 18 échantillons de miel en Europe [39]. Les valeurs mesurées pour l'ensemble de ces échantillons oscillaient entre 0,002 mg/kg et 0,02 mg/kg. Aussi, nos résultats ne corroborent pas ceux d'autres travaux précédents enregistrés en Algérie avec des teneurs 6 fois plus élevées. Ces teneurs variaient entre 0,018 et 0,019 mg/kg [31]. Mieux, des valeurs de cadmium nettement plus élevées (plus de 160 fois plus grande) de l'ordre de 0,5 mg/kg ont été quantifiées dans du miel égyptien [32]. Contrairement aux échantillons de miel de Banikoara dans lesquels de faibles doses de cadmium ont été mesurées, en Wallonie aucune trace de ce métal n'a été retrouvée [29]. Tout comme le plomb et l'arsenic, l'origine agricole du cadmium est aussi ici suspectée. En effet, le cadmium peut provenir d'engrais minéraux phosphatés et s'accumuler dans les végétaux (métal bioaccumulable) étant donné que les phosphates constituent une véritable source de pollution par le cadmium [29]. L'utilisation des engrais phosphatés inorganiques où les teneurs en cadmium peuvent être supérieures à 60 mg de Cd/kg de P_2O_5 est la principale cause de la contamination des sols au cadmium. Alors que notre réglementation nationale autorise des engrais phosphatés à forte teneur en cadmium, plusieurs Etats européens comme la Finlande, la Hongrie et la Slovaquie ont déjà instauré une limite inférieure ou égale à 60 mg de Cd/kg de P_2O_5 . Il est urgent que le Bénin emboîte le pas à ces pays en vue d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement et de la biodiversité.

3-1-4. Miel de Banikoara exempt de mercure

Aucune trace de mercure n'a été relevée dans les différents échantillons de miels prélevés et analysés au cours des deux années. Ces résultats sont semblables à ceux trouvés d'une part dans certains pays africains [32, 40] puis d'autre part dans des pays hors du continent africain [41, 42]. Le résultat de notre étude était

par contre contraire à d'autres travaux réalisés en Croatie et qui ont quantifié dans le miel 2,72 µg/kg de mercure [27]. Il est à noter que les résultats de notre étude ont donné un aperçu des dynamiques saisonnières et spatiales de la production du miel dans les régions cotonnières du nord Bénin. L'analyse des échantillons de miel de la zone d'étude a révélé la présence de quelques ETM (As, Cd et Pb). Ces traces de résidus d'ETM dans le miel proviendraient fort probablement de l'utilisation généralisée et abusive dans l'agriculture de pesticides de synthèse homologués ou non, vendus à ciel ouvert dans tous les marchés locaux. Les niveaux de résidus d'éléments traces étaient légèrement plus élevés dans les miels récoltés après la saison de la culture du coton (juillet à novembre). Ceci reflète l'utilisation intensive de pesticides dans la culture du coton. Des ETM ont été détectés dans des échantillons de miel provenant de lieux proches ou éloignés des exploitations cotonnières, ce qui suggère que la contamination par les pesticides s'étend au-delà des zones agricoles immédiates, probablement par le biais de la dispersion environnementale et de l'utilisation généralisée permanente. Bien que les concentrations en ETM soient inférieures aux seuils réglementaires, leur présence souligne la nécessité d'une application plus stricte de la réglementation sur les pesticides, d'une surveillance accrue et d'une éducation des agriculteurs à une gestion durable de la fertilité des sols par une combinaison des engrais organiques et minéraux par exemple.

Tableau 1 : Concentrations moyennes (mg/kg) des ETM dans le miel de Banikoara

ETM	Founougo		Kérérou		Founougo + Kérérou
	Mars 2022 et 2023	Novembre 2022 et 2023	Mars 2022 et 2023	Novembre 2022 et 2023	Mars et Novembre 2022 et 2023
Arsenic	0,006 ± 0,001	0,008 ± 0,002	0,006 ± 0,001	0,006 ± 0,001	0,006 ± 0,002
Cadmium	0,0004 ± 0	0,0007 ± 0,0	0,0003 ± 0,0	0,0006 ± 0,0	0,0003 ± 0,0
Mercure	ND	ND	ND	ND	ND
Plomb	0,004 ± 0,002	0,006 ± 0,002	0,003 ± 0,001	0,006 ± 0,002	0,003 ± 0,002

ND = non détecté

3-2. Relation entre période de collecte et présence d'ETM

La **Figure 2** rend compte des AFC de Founougo et de Kérérou.

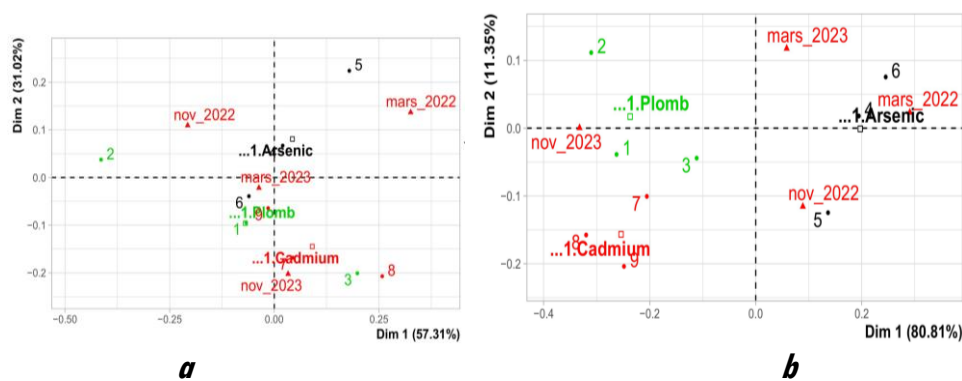


Figure 2 : Analyse Factorielle des Composantes de Founougo (a) et Kérérou (b)

Les résultats d'AFC entre la présence des ETM quantifiés et les périodes de prélèvements ont montré que 88,33 % des informations ont été expliquées par les deux dimensions à Founougo. Le test d'indépendance de Khi-deux réalisé sur les deux variables ont donné une p-value = 0.009074468, ce qui est inférieur au seuil critique de 5 %. Il n'y avait donc aucune liaison entre la présence des ETM dans le miel et les périodes de récolte dans cette localité. De même, dans la localité de Kérérou, au moins 92 % des informations ont été

expliquées par les deux axes. Le test d'indépendance de Khi-deux a donné une valeur de p-value qui était de 0.008419721, ce qui est inférieur au seuil de 5 %. Il s'est dégagé également qu'il n'y avait aucune liaison entre la présence des métaux dans le miel et les saisons dans la localité de Kérémo. Globalement qu'il s'agisse de Founougo ou de Kérémo, il s'est révélé donc à travers ces AFC que la présence des ETM dans le miel ne dépendait pas des moments auxquels les échantillons ont été collectés. Quelle que soit la période de récolte, le miel contenait toujours des résidus dont les taux pourraient varier. Ce constat s'expliquerait par le fait que la production agricole et l'utilisation d'intrants chimiques qui va avec se fait en continue dans la Commune. Outre la production en saison pluvieuse du coton et des vivriers, des dispositifs de maîtrise d'eau permettent une production surtout maraîchère de contre saison.

3-3. Corrélation entre les éléments traces quantifiés dans le miel

La **Figure 3** illustre les matrices de corrélation de Spearman entre les ETM respectivement dans les localités de Kérémo et de Founougo.

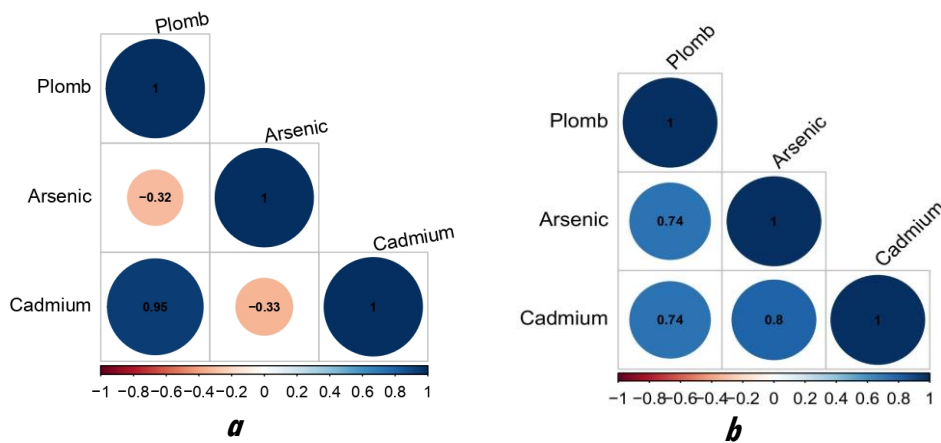


Figure 3 : Matrice de corrélation entre les ETM dans les échantillons de Kérémo (a) et de Founougo (b)

La **Figure 3a** a montré une relation positive et négative avec un intervalle de coefficients allant de -0.32 à 1. En effet, il existait une relation de cause à effet au niveau des résidus. On a noté que le plomb et cadmium exerçaient une corrélation négative sur l'arsenic alors qu'une relation positive s'observait entre plomb et cadmium. On en a déduit donc que l'augmentation ou la diminution d'une unité de plomb ou de cadmium entraînait nécessairement une réaction inverse sur l'arsenic. Aussi, l'augmentation d'une unité de plomb ou de cadmium entraînait nécessairement l'augmentation de l'autre mais pas de la même proportion. La matrice de corrélation de Spearman entre les ETM dans la localité de Founougo a été illustrée sur la **Figure 3b** qui ressort qu'il a existé au niveau de cette localité une relation positive forte avec un intervalle de coefficients allant de 0,74 à 1. C'était une relation de cause à effet au niveau des ETM. En effet, le plomb entretenait une relation proportionnelle avec l'arsenic et le cadmium (0,74) tandis que celle entre cadmium et arsenic était encore plus élevée (0,8). On conclut donc que l'augmentation d'une unité de l'une des variables entraînait nécessairement l'augmentation de l'autre mais pas de la même proportion.

3-4. Doses d'exposition aux ETM en deçà de la norme

Les doses journalières d'exposition aux ETM ont été estimées autant pour les enfants que pour les adultes. Les résultats sont résumés dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Valeurs calculées des Doses Journalières d'Exposition (mg/kg/j)

	DJE Arsenic	DJE Cadmium	DJE Mercure	DJE Plomb	Σ DJE
Enfants	4,29E-06	3,86E-07	nd	3,86E-06	8,53E-06
Adultes	4,17E-06	3,75E-07	nd	3,75E-06	8,29E-06

nd : non décelé

Tous les métaux pris individuellement ont présenté des valeurs de DJE inférieures à 1 aussi bien chez les enfants que chez les adultes. Il en était de même de la somme arithmétique qui étaient également inférieure à l'unité. Ainsi, chez les enfants, les DJE étaient comprises entre 3,86E-07 et 4,29E-06 mg/kg/j tandis que pour les adultes elles variaient entre 3,75E-07 et 4,17E-06 mg/kg/j. Qu'il s'agisse de l'enfant ou de la personne âgée, l'arsenic a eu la plus forte DJE et le cadmium la plus faible : DJE arsenic > DJE plomb > DJE cadmium. Toutes les DJE des enfants étaient légèrement supérieures à celles des adultes.

3-5. Consommation sans risque sanitaire du miel de Banikoara

3-5-1. Risques toxicologiques associés à une ingestion chronique du miel pour les effets à seuil de dose

Le Quotient ou Ratio de Danger (QD) et l'Indice de Danger (ID) ont permis d'évaluer quantitativement le risque sanitaire lié à la consommation du miel produit dans la Commune cotonnière de Banikoara. Les résultats de calculs de ces deux indicateurs autant pour les enfants que pour les adultes ont été illustrés par la **Figure 4**.

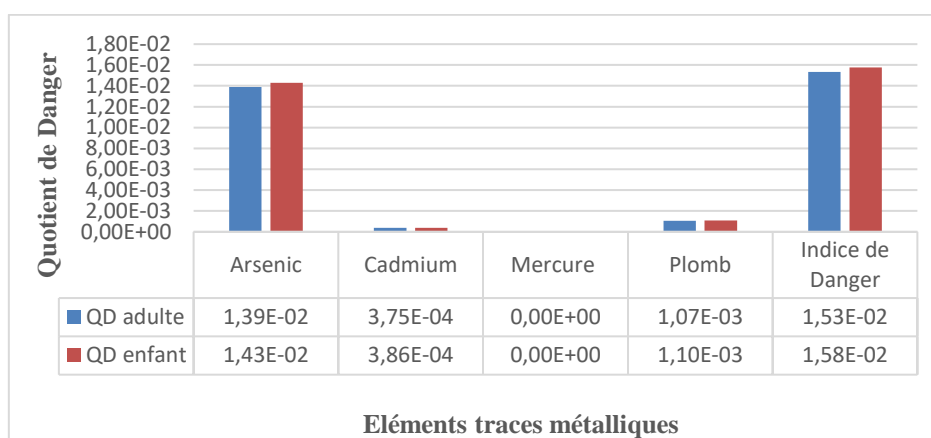


Figure 4 : Quotient et Indice de Danger liés à l'ingestion du miel

Les QD pour tous les ETM quantifiés étaient inférieurs à l'unité chez tous les types de consommateurs du miel (enfants et adultes). Ces QD ont fluctué entre 3,75E-04 et 1,39E-02 chez les adultes puis 3,86E-04 et 1,43E-02 chez les enfants. Dans tous les cas (enfant comme adulte), l'arsenic a présenté le quotient de danger le plus fort et le cadmium a été l'ETM à plus faible quotient de risque sanitaire. L'ordre croissant des quotients de risques sanitaires était donc le suivant : $QD_{\text{cadmium}} < QD_{\text{plomb}} < QD_{\text{arsenic}}$. Aussi, les quotients de danger des trois ETM étaient légèrement supérieurs chez les enfants que chez les adultes. Ceci peut être schématisé par la formule : $QD_{\text{arsenic enfant}} > QD_{\text{arsenic adulte}} > QD_{\text{plomb enfant}} > QD_{\text{plomb adulte}} > QD_{\text{cadmium enfant}} > QD_{\text{cadmium adulte}}$. Pour la plupart des études réalisées par d'autres Auteurs sur le miel, les quotients de danger (QD) calculés ont souvent été inférieures à 1 quoique ces QD soient parfois supérieures à ceux de notre étude. Ce fut par exemple le cas pour des études menées dans les Abruzzes en Italie où pour tous les éléments traces analysés

dans le miel, les valeurs QD étaient inférieures à 1 [43]. Idem pour d'autres travaux de recherche sur le miel qui ont révélé que les QD du Cd étaient comprises entre 9,02E-04 et 9,71E-03 respectivement pour les adultes masculins et féminins ciblés [44]. D'ailleurs, les valeurs QD pour tous les métaux traces examinés par ces Auteurs étaient comparativement plus élevées chez les femmes que chez les hommes en raison des différences dans le poids moyen des deux sexes. Ce même constat a été noté dans notre étude mais ici la comparaison a été faite entre les enfants puis les adultes et toutes les valeurs des variables QD étaient plus élevées chez les enfants que chez les adultes en raison assurément du faible poids corporel de ces derniers. L'indice de danger dans les deux cas d'individus était inférieur à 1. Tout comme le QD, l'ID des enfants (1,58E-02) était aussi un peu plus élevé que celui des adultes (1,53E-02) : $ID_{adultes} < ID_{enfant} < 1$. Les valeurs ID calculées dans d'autres études antérieures sont inférieures au seuil de sécurité tout comme dans la présente recherche. En outre dans ces études, ce sont les enfants qui avaient les plus forts indices : enfants (0,066) > adolescents (0,035) > adultes (0,025) [43].

3-5-2. Risques cancérigènes associés à la consommation chronique du miel pour les substances sans effet de seuil

Le risque cancérigène a été estimé par le calcul de l'ERI et l'IS. Les résultats de calculs de ces deux paramètres ont été indiqués dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Valeurs calculées des ERI et l'IS

	ERUo	DJE adulte	DJE enfant	ERI adulte	ERI enfant
As	1,50E+00	4,17E-06	4,29E-06	6,25E-06	6,43E-06
Cd	3,80E-01	3,75E-07	3,86E-07	1,43E-07	1,47E-07
Hg	-	-	-	-	-
Pb	8,50E-03	3,75E-06	3,86E-06	3,19E-08	3,28E-08
Somme ERI				6,42E-06	6,61E-06
IS				7,91E+01	8,14E+01

Quel que soit l'ETM ou le groupe d'âge, toutes les valeurs des ERI obtenues après calculs étaient inférieures à 10^{-5} qui est la valeur limite établie par divers organismes internationaux. Les valeurs ERI étaient comprises entre 3,19E-08 et 6,25E-06 chez les adultes puis 3,28E-08 et 6,43E-06 chez les enfants. Ainsi donc, la valeur maximale était de 6,43E-06 avec l'arsenic chez les enfants par contre l'ERI minimum était de 3,19E-08 pour le plomb au niveau des adultes. La somme des ERI des enfants a été légèrement plus élevée que celle des adultes ($6,61E-06 > 6,42E-06$). Toutefois cet ERI des enfants était 1,56 fois inférieur à l'excès de risque considéré comme seuil limite ($ERI = 10^{-5}$). Plusieurs recherches utilisant l'ERI pour caractériser le risque sanitaire des matrices apicoles alimentaires ont rapporté des valeurs dangereuses comprises entre 10^{-5} et 10^{-4} [44] contrairement à celles de notre étude. De même, en raison de l'exposition à de multiples éléments cancérigènes, la somme des ERI calculés par ces Auteurs était supérieure à 10^{-5} autant pour les enfants, les adolescents que les adultes contrairement à ce qui a été obtenu dans cette étude. S'agissant de l'ERC, au maximum 79 et 81 cas de cancers en excès, liés à la consommation de miel de Banikoara, sont susceptibles d'être détectés au cours de la vie respectivement pour les adultes et les enfants du Bénin. Quoi que globalement en faible concentration dans les échantillons de miel analysés, la présence d'ETM soulève des inquiétudes quant aux effets chroniques potentiels de l'exposition aux pesticides sur la santé humaine, les pollinisateurs et l'environnement au sens large. Pour relever ces défis, il est essentiel d'adopter la lutte intégrée contre les ravageurs, de promouvoir la production de miel sans résidus et de mettre en œuvre des systèmes de traçabilité. Ces mesures permettront non seulement d'atténuer les risques environnementaux

et sanitaires liés à l'utilisation des pesticides, mais aussi d'améliorer la commercialisation et la durabilité de la production de miel dans la région. Cette recherche fournit une base aux décideurs politiques, aux agriculteurs et aux parties prenantes pour développer des interventions ciblées qui préservent la santé des écosystèmes, des pollinisateurs et des consommateurs tout en garantissant la viabilité économique de la production de miel dans le nord du Bénin.

4. Conclusion

Evaluer sous l'angle des éléments traces métalliques la qualité sanitaire du miel produit dans la Commune de Banikoara, un des bastions de la production du coton conventionnel, était l'ultime but de la présente étude. Des quatre ETM recherchés, trois dont l'arsenic, le cadmium et le plomb ont été constamment détectés et quantifiés dans l'ensemble des 24 échantillons de miel collectés de 2022 à 2023. Aucune trace de mercure n'a été retrouvée. Toutes les doses journalières d'exposition étaient inférieures aux valeurs toxicologiques de référence. De même, aucun des paramètres d'évaluation quantitative de risque sanitaire dont notamment le quotient de danger et l'excès de risque individuel n'était supérieur à la valeur limite fixée à l'échelle internationale. Le miel de Banikoara bien que produit dans un environnement cotonnier ne présente donc aucun risque potentiel pour la santé des consommateurs (enfants et adultes) nationaux et étrangers. Néanmoins, il faut prendre des mesures pour renforcer la veille tant au niveau de l'apiculteur lui-même qu'au niveau des institutions qui ont cette mission régaliennne.

Références

- [1] - Codex Alimentarius, Norme pour le miel (Codex Stan 1981 révisé), FAO, Rome. (2001).
- [2] - S. MEKIOUS, Z. HOUMAN, E. BRUNEAU, C. MASSEAU, A. GUILLET et T. HANCE, Caractérisation des miels produits dans la région steppique de Djelfa en Algérie, "*Biotechnol. Agron. Soc. Environ*", 19 (3) (2015) 221 - 231
- [3] - D. ABERSI, K. HENNA et A. RAHEM, Etude comparative des caractéristiques physicochimiques et organoleptiques de certains miels locaux et importés : Etude de cas. Mémoire de master en sciences alimentation humaine et qualité des produits non publié, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, (2016) 51 p.
- [4] - MAEP (Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche), Direction de la Statistique Agricole, les chiffres définitifs de la campagne agricole 2021-2022, mai 2022 (2022)
- [5] - MAEP (Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche), Rapport de Performances du Secteur Agricole, Gestion 2021, (2021) 131 p.
- [6] - S. ADAM, A. EDORH, H. TOTIN, L. KOUMOLOU et K. AKLIKOKOU, Pesticides et métaux lourds dans l'eau de boisson, les sols et les sédiments de la ceinture cotonnière de Gogounou, Kandi et Banikoara (Bénin). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 4 (2010) 1170 - 1179. DOI : 10.4314/ijbcs.v4i4.63054
- [7] - G. H. F. GBESSO, B. F. YABI, M. E. DOSSOU, O. T. LOUGBEGNON, B. TENTE et J. T. C. CODJIA, Utilisation ethno-zoologique des produits et sous-produits des abeilles à l'Est de la Réserve de Biosphère Transfrontalière de W au Bénin. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.*, 7 (4) (2019) 550 - 556
- [8] - J. A. DJOSSOU, F. P. TCHOBO, H. YEDOMONHAN, A. G. ALITONOU et M. M. SOUMANOU, Evaluation des caractéristiques physicochimiques des miels commercialisés à Cotonou. *Tropicultura.*, 31 (3) (2013) 163 - 169.
- [9] - Y. A. H. KINDJI et E. YEHOUEOU AZEHOUN PAZOU, Contamination du miel par des résidus de pesticides chimiques dans la Commune de Banikoara (Bénin). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 18 (5) (2024) 2001 - 2021

- [10] - I. H. KENALI, R. S. ZANOU, A. MAMA, F. AMAKPE, M. G. TOSSOU, G. A. MENSAH et A. AKOEGNINOU, Contenu pollinique des miels récoltés dans un champ de *Cajanus cajan* (L.) Millsp (Fabaceae) dans la commune de Djidja (Bénin). *Annales Scientifiques du Limousin*, (30) (2021)
- [11] - J. WANG, et Q. X. LI, Chemical composition, characterization, and differentiation of honey botanical and geographical origins. In S. Taylor (Ed.), *Advances in food and nutrition research*, Vol. 62, (2011) 89 - 137 p. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385989-1.00003-X>
- [12] - PDC (Plan de développement communal) III-Banikoara, 2017-2021 (2017) 200 p.
- [13] - MAEP (Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche), Politique Phytosanitaire en République du Bénin, (2014) 56 p.
- [14] - INSAE (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique), Document de travail N°DSEE2020DT02, version révisée de la monographie de la filière du coton au Bénin, (2020) 54 p.
- [15] - A. DEVEZ, Caractérisation des risques induits par les activités agricoles sur les écosystèmes aquatiques. Thèse de l'ENGREF : Centre de Montpellier, (2004) 269 p.
- [16] - M. TUZEN, S. SILICI, D. MENDIL et M. SOYLAK, Trace element levels in honeys from different regions of Turkey, *Rev. Food Chem.*, 103 (2007) 325 - 330. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.053>
- [17] - U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). Human health risk assessment. <https://www.epa.gov/risk/human-health-risk-assessment>. (2017), (lien consulté le 16/06/2023)
- [18] - U. S. EPA (United States Environmental Protection Agency), Supplementary guidance for conducting health risk assessment of chemical mixtures. Risk Assessment Forum Technical Panel ; Washington, DC: US.EPA, (2015)
- [19] - ASTEE (Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement), Guide pour l'évaluation du risque sanitaire dans le cadre de l'étude d'impact d'une UIOM, (2003) 60 p.
- [20] - M. SCIVICCO, J. SQUILLANTE, S. VELOTTO, F. ESPOSITO, T. CIRILLO et L. SEVERINO, Dietary Exposure to Heavy Metals through Polyfloral Honey from Campania Region (Italy). *J. Food Compos. Anal.*, 114 (2022) 104748. DOI : 10.1016/j.jfca.2022.104748
- [21] - InVS/afset, Estimation de l'impact sanitaire d'une pollution environnementale et évaluation quantitative des risques sanitaires. Synthèse provisoire du rapport. SANITAIRES, (2005)
- [22] - J. M. R. ANTOINE, L. A. H. FUNG et C. N. GRANT, Assessment of the potential health risks associated with the aluminium, arsenic, cadmium and lead content in selected fruits and vegetables grown in Jamaica. *Toxicol. Reports*. 4 (2017) 181 - 187. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.03.006> PMID : 28959639
- [23] - H. R. GEBEYEHU and L. D. BAYISSA, Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia. *PLoS ONE* 15(1) (2020): e0227883. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227883>
- [24] - C. KAMUNDA, M. MATHUTHU et M. MADHUKU, Health risk assessment of heavy metals in soils from Witwatersrand gold mining basin, South Africa. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13 (2016) 663. <https://doi.org/10.3390/ijerph13070663> PMID : 27376316
- [25] - Health Canada. Federal Contaminated Site Risk Assessment in Canada, Part V : Guidance on Complex Human Health Detailed Quantitative Risk Assessment for Chemicals (DQRACHEM) ; Health Canada : Ottawa, ON, USA, (2010)
- [26] - INStaD (Institut National de la Statistique et de la Démographie), Projection démographique de 2014 à 2063 et perspective de la demande sociale de 2014 à 2030 au Bénin, INStaD, décembre 2022 (2022)
- [27] - N. BILANDŽIĆ, M. ĐOKIĆ, M. SEDAK, B. S. KOLANOVIĆ, I. VARENINA, A. KONČURAT et N. RUDAN, Determination of trace elements in Croatian floral honey originating from different regions. *Food Chemistry*, 128 (2011) 1160 - 1164. DOI : 10.1016/j.foodchem.2011.04.023

- [28] - T. GOLOB, U. DOBERSEK, P. KUMP et M. NECEMER, Determination of trace and minor elements in Slovenian honey by total reflection X-ray fluorescence spectroscopy, *Rev, Food Chem.*, 91 (2005) 593 - 600. DOI : 10.1016/j.foodchem.2004.04.043
- [29] - M. WARNIER, Des métaux dans les miels wallons ? abeilles & cie, 4-N° 173 (2016)
- [30] - O. LAMBERT, Contamination chimique de matrices apicoles au sein de ruchers appartenant à des structures paysagères différentes. Thèse de doctorat d'université. Université Blaise Pascal, (2012) 350 p.
- [31] - H. YAICHE ACHOUR et M. KHALI, Composition physicochimique des miels algériens. Détermination des éléments traces et des éléments potentiellement toxiques. "*Afrique Science*", 10 (2) (2014) 127 - 136
- [32] - M. N. RASHED et M.E. SOLTAN, Major and trace elements in different types of Egyptian mono-floral and non-floral bee honeys. *Journal of Food Composition and Analysis* 17 (2004) 725 - 735. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2003.10.004>
- [33] - E. A. PAZOU YEHOUEYOU, A. SOTON, A. AZOCLI, H. ACAKPO, M. BOKO, L. FOURN, D. HOUINSA, J-C KEKE et B. FAYOMI, Contamination du sol, de l'eau et des produits maraîchers par des substances toxiques et des métaux lourds sur le site de Houéyiho (Cotonou) en République du Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 4 (6) (2010) 2160 - 2168. DOI : 10.4314/ijbcs.v4i6.64951.
- [34] - N. YAMAGUCHI, A. KAWASAKI et I. HIYAMA, Distribution of uranium in soil components of agricultural fields after long-term application of phosphate fertilizers, *Sci. Total Environ*, 407 (2009) 1383 - 1390. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.011>
- [35] - D. K. GUPTA, S. CHATTERJEE, S. DATTA, V. VEER et C. WALTHER, Role of phosphate fertilizers in heavy metal uptake and detoxification of toxic metals. *Chemosphere*, 108 (2014) 134 - 144. DOI : 10.1016/j.chemosphere.2014.01.030
- [36] - E. STANKOVSKA, T. STAFILOV et R. ŠAJN, Monitoring of trace elements in honey from the Republic of Macedonia by atomic absorption spectrometry. *Environmental monitoring and assessment*, 142 (1-3) (2008) 117 - 126. DOI : 10.1007/s10661-007-9913-x
- [37] - P. SIPOS, T. NEMETH, V. KOVACS et I. MOHAI, Sorption of copper, zinc and lead on soil mineral phases. *Chemosphere*, 73 (2008) 461 - 469. DOI : 10.1016/j.chemosphere.2008.06.046
- [38] - T. MARTIN, Inventaire des recherches conduites au Bénin portant sur l'impact des pratiques agricoles sur la santé humaine, Rapport de mission, (2010) 21 p.
- [39] - S. BOGDANOV, Contaminants of bee products. *Apidologie*, 37 (2005) 1 - 18. <https://doi.org/10.1051/apido:2005043>
- [40] - A. C. ACHUDUME et B. N. NWAFOR, The ecological assessment of metals in local brands of honey in Southwest Nigeria. *African Journal of Agricultural Research*, 5 (2010) 2608 - 2610. <https://doi.org/10.5897/AJAR.9000690>
- [41] - C. FREDES et G. MONTENEGRO, Heavy metals and other trace elements contents in Chilean honey. *Ciencia e Investigación Agraria*, 33 (2006) 50 - 58.
- [42] - I. FRIAS, C. RUBIO, T. GONZÁLES-IGLESIAS, A. J. GUTIÉRREZ, D. GONZÁLES-WELLER et A. HARDISSON, Metals in fresh honeys from Tenerife Island, Spain. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 80 (2008) 30 - 33. DOI : 10.1007/s00128-007-9301-9
- [43] - F. FLAMMINII, A. CONSALVO, A. CICHELLI et A. CHIAUDANI, Assessing Mineral Content and Heavy Metal Exposure in Abruzzo Honey and Bee Pollen from Different Anthropic Areas. *Foods*, 13 (2024) 1930. <https://doi.org/10.3390/foods13121930>
- [44] - Q. M. RU, Q. FENG et J. Z. HE, Risk Assessment of Heavy Metals in Honey Consumed in Zhejiang Province, Southeastern China. *Food Chem. Toxicol*, 53 (2013) 256 - 262. DOI 10.1016/j.fct.2012.12.015