

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة

UNIVERSITE 20 AOUT 1955- SKIKDA



Faculté des Sciences

Département des Sciences de la Nature et de la Vie

Mémoire Présenté en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Filière: Sciences Biologiques

Option: Ecotoxicologie Animale

Intitulé

**Évaluation de la pollution par les métaux lourds dans le lait de vache
produit dans différentes zones d'élevage de la région de Skikda**

Présenté Par: Boudiba Rania

Hallas Moufida

Hamida Amina

Boulbit Feryal

Membre de Jury:

Pr. Fekrache Fadila	Pr	Présidente	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Dr. Boudeffa khaled	MCA	Encadreur	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Dr. Oudjane Faiza	MCA	Examinatrice	Université du 20 Août 1955 – Skikda

Année universitaire 2024/2025.

Remerciements

À la fin de ce travail, nous remercions Dieu Tout-Puissant pour son aide, sa bénédiction, et la force qu'Il nous a accordée pour mener à bien cette étude.

Nous exprimons également notre profonde gratitude aux membres du jury : la présidente du jury Pr. Fekrache Fadila et le second examinatrice Dr. Oudjane Faiza , pour avoir accepté de juger ce travail.

*Nous adressons nos remerciements les plus sincères à **Dr. Khaled Boudeffa**, encadrant de ce mémoire, pour ses conseils précieux, son soutien et son accompagnement tout au long de cette recherche.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement **l'ingénieur Ahmed Boudiba** pour son appui technique, ses orientations pertinentes et son aide précieuse durant les différentes étapes de ce projet.*

*Nous adressons également nos vifs remerciements aux techniciennes de laboratoire **Boulouma Amani, Talhi Wissal et Bouaouina Ibtissem**, pour leur accompagnement bienveillant, leur encadrement attentif et leur soutien constant. Leur présence à nos côtés a grandement facilité l'avancement de notre travail et nous a permis de progresser avec confiance à chaque étape.*

*Nos remerciements les plus sincères vont aussi à **Dr. Amira Toumi**, dont le soutien remarquable et la bienveillance nous ont profondément touchées. Elle a été pour nous comme une sœur, toujours disponible et généreuse de son temps et de ses efforts.*

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de Ce travail.

Dédicace

Quand Dieu trace un chemin à l'âme...

Il lui accorde de Sa lumière ce qu'il faut pour continuer.

À ma mère et à mon père

L'origine de mon histoire, tout ce que j'ai accompli est une extension de vous.

À ma sœur, absente par la présence, mais éternellement ancrée dans mon cœur...

Que la paix, la miséricorde et la nostalgie apaisée t'accompagnent.

À mes frères, toujours proches même dans l'éloignement, avec des mots simples...

Merci pour votre présence.

*À ma grande sœur, mon amie fidèle, et à Adam et Amdjad... vos rires étaient un éclat
d'enfance au milieu de l'épuisement.*

À mes collègues et amies

*Compagnes de route, de bancs, et de moments... Certaines sont passées, d'autres ont laissé
une empreinte indélébile.*

À celui qui viendra partager le reste de l'histoire

Tu n'es pas dans ces lignes, mais entre les battements et les prières...

À moi-même...

*Tu as été forte dans ton silence, authentique dans tes pas, et c'est ce qui te sied : le calme
quand il triomphe.*

Louange à Dieu pour ce qui fut, ce qui est, et ce qui sera.

Rania.

Dédicace

Au nom d'Allah

le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux "Mon succès ne dépend que d'Allah. En Lui je place ma confiance, et vers Lui je me tourne." Louange à Allah pour Ses innombrables bienfaits, pour la force qu'Il m'a accordée, pour les chemins qu'Il a facilités et pour les épreuves qu'Il a allégées.

À moi-même

Merci de ne pas avoir abandonné, même face aux moments les plus difficiles, et d'avoir cru que Dieu ne laisse jamais perdre la patience sincère.

À mes parents

Qu'Allah vous récompense pour vos invocations, votre amour et votre soutien constant.

À mes frères et sœurs

vos cœurs, vos prières et votre affection ont été ma lumière dans les moments d'épuisement. Et à vos enfants, qui furent une joie et un baume apaisant dans ma fatigue.

À mon amie Rayan

Merci d'avoir été un appui solide, une épaule qui ne flanche pas.

À mes collègues, merci pour votre sincérité, votre entraide et l'esprit d'équipe qui nous a unies dans ce parcours.

Enfin

À celui dont le soutien fut discret et la présence silencieuse... Qu'Allah te récompense en secret comme tu l'as été pour moi. Je prie qu'Il réunisse les âmes sincères, tôt ou tard, sous l'ombre de Sa miséricorde.

Moufida

Dédicace

C'est avec tout mon amour et ma gratitude que je dédie ce modeste travail à ceux qui ont eu le mérite, après Dieu, puis moi-même

Moi qui n'ai ménagé aucun effort, supportant fatigue et épreuves tout au long de ce long parcours Dans tout ce que j'ai pu accomplir :

Ma profonde reconnaissance va à mes parents, mon père Nassir Hamida et ma mère Zahra Hamida, pour leur soutien constant et leur appui indéfectible.

À tous mes frères et sœurs, pour leur présence bienveillante et leurs encouragements.

À mes amis, qui ont partagé avec moi cette aventure dans toutes ses dimensions.

Et à toutes les personnes qui me connaissent et ont contribué à ma réussite, ne serait-ce que par une parole bienveillante ou une prière

Je vous adresse mes plus sincères remerciements et toute ma considération.

Amina

Dédicace

*À ceux qui ont semé en moi les graines de l'espoir, et m'ont nourrie de leur amour jusqu'à ce
que mon rêve fleurisse...*

À mon père

mon pilier silencieux, dont le labeur a été le fondement de mon parcours.

À ma mère

dont les prières ont illuminé mon chemin – je te dois tout, et même plus.

À ma sœur aînée,

mon premier refuge après maman, soutien dans mes faiblesses et joie dans mes peines.

À mes frères

épaules solides quand les jours vacillaient,

À mon petit frère

le plus proche de mon cœur, ami avant d'être frère, âme fidèle de chaque instant.

*À mon futur partenaire de vie, merci d'avoir été mon refuge dans la fatigue, et ma force dans
le doute.*

Merci d'avoir choisi d'être au cœur de cette aventure, et non en marge.

À mes amis, qui ont allégé la fatigue et embelli les moments partagés.

À moi-même

Qui ai résisté malgré l'épuisement et les déceptions, et qui aujourd'hui souris avec fierté.

Feryal

Résumé :

La contamination par les métaux lourds constitue l'un des défis environnementaux majeurs, compromettant la sécurité des denrées alimentaires et la santé des consommateurs. Dans ce contexte, la présente étude a pour objectif d'évaluer le niveau de contamination métallique du lait cru produit dans la wilaya de Skikda, à travers l'analyse des concentrations de cinq métaux lourds — fer, plomb, cuivre, cadmium et chrome — dans des échantillons prélevés dans deux zones distinctes : Hammoudi Hamrouche (zone polluée à dominance industrielle) et Bin El Ouiden (zone non polluée).

Les résultats ont mis en évidence des concentrations élevées de certains métaux, notamment le plomb et le cadmium dans la zone industrielle, dépassant dans certains cas les limites admissibles, ce qui soulève des préoccupations quant aux risques sanitaires potentiels. L'analyse statistique a également révélé des différences significatives entre les deux zones, confirmant l'influence de l'environnement sur la qualité du lait cru.

L'étude conclut que le lait cru peut être utilisé comme bioindicateur pertinent pour la surveillance de la pollution environnementale, et souligne la nécessité de renforcer les mesures de contrôle sanitaire dans les zones à risque.

Mot clés : pollution , métaux lourd , lait de vache , skikda , santé

الملخص

تُعدّ التلوث بالمعادن الثقيلة أحد التحديات البيئية الكبرى، لما له من تأثير سلبي على سلامة المنتجات الغذائية وصحة المستهلكين.

وفي هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مستوى التلوث المعدني في الحليب الخام المنتج في ولاية سكيكدة، من خلال تحليل تراكيز خمسة معادن ثقيلة — الحديد، الرصاص، النحاس، الكاديوم والكروم — في عينات مأخوذة من منطقتين مختلفتين: حمودي حمروش (منطقة ملوثة صناعيًا) وبن العويدين (منطقة غير ملوثة).

أظهرت النتائج وجود تراكيز مرتفعة لبعض المعادن، خاصة الرصاص والكاديوم في المنطقة الصناعية، متجاوزة في بعض الحالات الحدود المسموح بها، مما يثير القلق بشأن المخاطر الصحية المحتملة. كما كشفت التحليلات الإحصائية عن وجود فروقات معنوية بين المنطقتين، مما يؤكد تأثير البيئة على جودة الحليب الخام.

وتخلص الدراسة إلى أن الحليب الخام يمكن أن يُستخدم كمؤشر حيوي فعال لمراقبة التلوث البيئي، كما تؤكد على ضرورة تعزيز إجراءات الرقابة الصحية في المناطق المعرضة للخطر.

الكلمات المفتاحية: تلوث ' معادن ثقيلة ' حليب بقر ' سكيكدة ' صحة

Abstract

Heavy metal contamination is one of the major environmental challenges, compromising the safety of food products and public health. In this context, the present study aims to assess the level of metal contamination in raw cow's milk produced in the Skikda province, through the analysis of five heavy metals — iron, lead, copper, cadmium, and chromium — in samples collected from two distinct areas: Hammoudi Hamrouche (an industrially polluted zone) and Bin El Ouiden (a non-polluted zone).

The results revealed high concentrations of certain metals, particularly lead and cadmium, in the industrial zone, with some values exceeding permissible limits, raising concerns about potential health risks. Statistical analysis also showed significant differences between the two areas, confirming the influence of environmental conditions on raw milk quality.

The study concludes that raw milk can serve as a relevant bioindicator for monitoring environmental pollution and highlights the need to strengthen sanitary control measures in high-risk areas.

Keywords : pollution , heavy metal , cow milk ,skikda , health

Liste des Figures		
Figure	Titre	Page
01	Localisation géographique de la wilaya de Skikda (Image satellite, google Earth)	16
02	Variations mensuelles de la température et des précipitations à Skikda (2010–2024) (Station météorologique de Stora– Skikda 2024)	18
03	Hammoudi Hamrouch (Photo originale 2025)	20
04	Bin El Ouiden (Photo originale 2025)	20
05	Prélèvement des échantillons (Photo originale 2025)	21
06	Transport des échantillons (Photo originale 2025)	21
07	Plaque chauffante (Photo originale 2025)	23
08	Four à moufle (Photo originale 2025).....	23
09	Hotte à flux laminaire (Photo originale 2025).....	23
10	Spectromètre d'absorption atomique à flamme SAAF	23
11	Stérilisation du matériel de travail (Photo originale 2025).....	24
12	La préparation des échantillons de lait (Photo originale 2025).....	25
13	Séchage des échantillons (Photo originale 2025).....	27
14	Réduction des échantillons en cendre (Photo originale 2025).....	28
15	Homogénéisation du mélange (Photo originale 2025).....	29
16	Filtration des échantillons (Photo originale 2025).....	29
17	Variation de la concentration en métaux lourds (en mg/L) dans la zone polluée.....	34
18	Variation de la concentration en métaux lourds (en mg/L) dans la zone non polluée.....	34
19	Variation des concentrations de fer en mg/L dans les deux zones échantillonnées.....	35
20	Variation des concentrations du Plomb en mg/L dans les deux zones échantillonnées.....	36
21	Variation des concentrations du Cuivre en mg/L dans les deux zones échantillonnées.....	38
22	Variation des concentrations du Cadmium en mg/L dans les deux zones échantillonnées.....	39
23	Variation des concentrations du Chrome en mg/L dans les deux zones échantillonnées.....	40

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
01	Caractéristiques des sites d'échantillonnage sélectionnés.....	20
02	Variation de la concentration en métaux lourds dans le lait cru entre les 2 zones polluées et non polluées.....	32
03	Les analyses des 5 indices environnementaux et sanitaires en zone pollué.....	42
04	Les analyses des 5 indices environnementaux et sanitaires en zone non pollué.....	43

Liste des abréviations

Pb : le plomb

Cd : le cadmium

Cu : le cuivre

Zn : le zinc

Ph : Potentiel hydrogen

Hg: le mercure

As: l'arsenic

Cr⁶⁺ : le chrome hexavalent

Mn : le manganèse

Ag : l'argent

Pt : platine

U : uranium

Th : le thorium

Fe : le fer

Ni : le nickel

HNO₃ : Acide nitrique

Cr : le chrome

SAAF : Spectromètre d'absorption atomique à flamme

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION.....	01
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	04
1. Aspect de métaux lourds.....	04
1.1. Généralités.....	04
1.1.1.Définition des métaux lourds.....	04
1.1.2.Origine des métaux lourds	05
1.1.3.Classification des métaux lourds.....	06
1.1.4. Les caractéristique des métaux lourds.....	06
1.1.5. Les propriétés physicochimiques des métaux lourds	10
1.1.6. Concentration des métaux lourds dans les produits laitiers	13
CHAPITER II : Matériels et Méthodes.....	16
1 .Présentation de la région d'étude.....	16
1.1.Situation géographique de la Wilaya Skikda.....	16
1.1.1.Climatologie général de la région	17
1.2.Situation géographique des sites d'études	18
2. Echantillonnage.....	19
2.1. Choix des sites d'études	19
2.2. Prélèvement et traitement des échantillons de lait cru de vache.....	20
3. Protocole au niveau de laboratoire.....	23
3.1. Traitement des matériaux avant usage.....	23
3.2. Préparation des échantillons	24
3.3. Minéralisation des échantillons	26
3.4. Protocole expérimental de la minéralisation des échantillons.....	26
3.4.1.Séchage des échantillons	26
3.4.2. Calcination	27
3.5. Filtration et mise en solution	28
3.6. Analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique.....	29
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.....	33

1. Analyse comparative des concentrations en métaux lourds	32
2. Variations des concentrations pour chaque méta.....	35
3. Évaluation des risques sanitaires liés à la consommation du lait issu des différentes zones d'élevage de la région de Skikda.....	41
CONCLUSION.....	45
Références bibliographiques	47

INTRODUCTION

La pollution de l'environnement, en particulier la pollution d'origine industrielle, constitue aujourd'hui l'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les pays à l'échelle mondiale. Cette problématique s'est aggravée au fil des décennies, en raison de l'essor rapide des activités industrielles, accompagné d'un rejet massif de substances chimiques dangereuses dans les écosystèmes, notamment les métaux lourds. Ces contaminants, du fait de leur toxicité, de leur persistance dans l'environnement et de leur capacité à s'accumuler dans les organismes vivants, représentent un réel danger pour la santé humaine, animale et pour l'ensemble des chaînes trophiques (Hafsi et al., 2024).

La région méditerranéenne est considérée comme l'une des zones les plus écologiquement vulnérables du globe. Sa situation géographique, combinée à une forte densité de populations et d'activités économiques (industries, agriculture intensive, élevage), en fait un espace particulièrement exposé aux pollutions multiformes. Ce contexte favorise une contamination croisée des sols, de l'air, des ressources hydriques et, par conséquent, des denrées alimentaires (Park & Haenlein, 2013; Claeys et al., 2014).

Dans ce cadre, la wilaya de Skikda, située au nord-est de l'Algérie, illustre parfaitement cette double vulnérabilité environnementale et alimentaire. Elle se distingue par une juxtaposition marquée entre zones agricoles fertiles et installations industrielles de grande envergure. Plus spécifiquement, la région de Hamadi Krouma abrite un important complexe pétrochimique, comprenant une raffinerie de pétrole, des usines de production d'engrais, et divers établissements industriels susceptibles de générer des rejets massifs en métaux lourds. Ces substances, lorsqu'elles contaminent les chaînes alimentaires, compromettent la qualité des produits locaux, notamment ceux d'origine animale (Belhadj & Boudoukha, 2014; Aiche et al., 2015).

Le lait, produit de consommation courante et reconnu pour ses qualités nutritionnelles exceptionnelles, fait partie des aliments les plus vulnérables à ce type de contamination. En effet,

il constitue une source essentielle de protéines (comme la caséine), de lipides, de glucides (lactose), de vitamines (A, D, B12) et de minéraux (calcium, phosphore, magnésium), ce qui en fait un aliment indispensable à la croissance, à la consolidation du système immunitaire et au bon fonctionnement de l'organisme (Park & Haenlein, 2013). Cependant, cette richesse biologique ne le prémunit pas contre les polluants chimiques, notamment les métaux lourds, qui peuvent s'y retrouver par le biais de divers vecteurs : alimentation du bétail, eau, sol, air, mais aussi conditions d'élevage, de traite et de stockage (MedECC, 2020; UNEP/MAP, 2020).

Parmi les métaux les plus fréquemment identifiés dans le lait, on retrouve le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le mercure (Hg) et l'arsenic (As). Ces éléments présentent un risque accru pour la santé du fait de leur toxicité, même à faibles concentrations, et de leur capacité à s'accumuler dans les tissus vivants. Le plomb, par exemple, affecte le système nerveux et peut engendrer des troubles cognitifs graves, notamment chez les enfants. Le cadmium est toxique pour les reins et perturbe le système endocrinien. Le cuivre et le zinc, bien que nécessaires à faibles doses, deviennent nocifs lorsqu'ils sont présents en excès, provoquant des troubles digestifs, hépatiques et des déséquilibres minéraux (Scott & Sloman, 2004 ; Rainbow, 2007 ; Mainuddin et al., 2021).

Plusieurs études scientifiques ont mis en évidence la présence de ces contaminants dans le lait commercialisé, soulignant leur origine multifactorielle : qualité de l'environnement, type de système de production, état sanitaire des animaux, et conditions d'hygiène. De plus, certaines recherches ont révélé que la concentration de ces éléments varie selon la saison, l'alimentation du bétail, ou encore la nature du sol (Licata et al., 2004 ; Yahaya et al., 2010). Lorsque leurs teneurs dépassent les seuils tolérables fixés par les autorités sanitaires, ces métaux peuvent entraîner de sérieuses complications : troubles neurologiques, insuffisance rénale, atteintes hépatiques, immunodépression, voire cancers (Hussain et al., 2010 ; Ahmad et al., 2011 ; Bushra et al., 2014).

Plus récemment, des revues scientifiques ont identifié la contamination du lait comme l'un des risques émergents majeurs des dernières décennies, en lien direct avec la dégradation de l'environnement et la pression anthropique croissante. Il a été recensé jusqu'à 38 oligo-éléments dans le lait cru, dont les concentrations sont directement influencées par les conditions

environnementales, ce qui confère au lait le statut de bioindicateur de choix pour évaluer la pollution locale (Dobrzański et al., 2005).

Dans ce contexte, la présente étude s'inscrit dans une démarche d'évaluation environnementale et sanitaire, en se focalisant sur le lait cru produit dans quelques endroits de la wilaya de Skikda. Elle vise à :

- Détecter et quantifier les concentrations de métaux lourds dans des échantillons de lait issus de ces régions ;
- Identifier les sources potentielles de contamination ;
- Et évaluer les risques sanitaires liés à la consommation de ce lait, notamment chez les populations les plus sensibles.

Ce travail est structuré en trois chapitres :

- Le **premier chapitre** présente une revue bibliographique sur les métaux lourds, leur origine, leur devenir dans l'environnement, leur toxicité, ainsi que leur présence dans les denrées alimentaires d'origine animale, en particulier le lait ;
- Le **deuxième chapitre** est consacré à la présentation de la zone d'étude, à la méthodologie adoptée pour le prélèvement et l'analyse des échantillons, ainsi qu'aux techniques d'identification et de dosage des métaux lourds ;
- Enfin, le **troisième chapitre** expose les résultats obtenus, suivis d'une discussion critique et d'une évaluation des risques sanitaires liés à la contamination du lait par les métaux lourds dans la région étudiée.

CHAPITRE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Aspect des métaux lourds

1.1. Généralités

1.1.1. Définition des métaux lourds

Les métaux lourds constituent un groupe d'éléments métalliques ou semi-métalliques caractérisés par une **densité élevée** (généralement supérieure à 5 g/cm³) et une **toxicité marquée**, même à de très faibles concentrations. Ils sont naturellement présents dans la croûte terrestre, mais leurs concentrations dans les écosystèmes ont considérablement augmenté en raison de diverses activités anthropiques telles que l'industrialisation, l'intensification de l'agriculture, les transports, la combustion des combustibles fossiles, et les rejets miniers.

Sur le plan biologique, ces éléments se distinguent par leur **toxicité cumulative**, leur **capacité de bioaccumulation** (accumulation progressive dans les tissus des organismes vivants), et leur **biodisponibilité**, c'est-à-dire leur aptitude à être absorbés et à interagir avec les systèmes biologiques. Une fois dans l'organisme, ils peuvent se lier à des protéines ou des enzymes, inhiber des réactions métaboliques essentielles, induire un **stress oxydatif**, perturber l'homéostasie cellulaire, et provoquer des effets chroniques tels que des maladies neurologiques, rénales ou cancéreuses.

Les métaux lourds les plus préoccupants en écotoxicologie comprennent notamment :

- **Le plomb (Pb)** : neurotoxique, particulièrement dangereux pour les enfants.
- **Le cadmium (Cd)** : toxique pour les reins et les os.
- **Le mercure (Hg)** : affecte le système nerveux central.
- **L'arsenic (As)**: cancérigène connu.
- **Le cuivre (Cu) et le zinc (Zn)** : oligoéléments essentiels, mais toxiques en excès.

Il est important de souligner que certains métaux lourds, tels que le cuivre, le zinc et le manganèse, sont indispensables à l'organisme à **très faibles doses**. Cependant, leur accumulation excessive peut provoquer des perturbations physiologiques majeures.

1.1.2. Origine des métaux lourds

Les métaux lourds présents dans l'environnement peuvent provenir de sources **naturelles** ou **anthropiques**.

1.1.2.1. Origine naturelle

- **Processus géologiques** : Les métaux lourds peuvent être libérés dans l'environnement à la suite d'éruptions volcaniques, de l'érosion et de l'altération des roches ignées et métamorphiques (Bradl, 2005 ; Cyraniak&Bołzan, 2014).

- **Formation des sols** : Les processus pédogénétiques, tels que la désagrégation minérale et les transferts biogéochimiques, contribuent également à la libération naturelle de ces métaux dans les écosystèmes terrestres (Bradl, 2005).

1.1.2.2. Origine anthropique

- **Émissions industrielles** : Les procédés industriels, les incinérateurs, les fonderies et les centrales thermiques libèrent d'importantes quantités de métaux lourds dans l'air, l'eau et les sols (Cyraniak&Bołzan, 2014 ; Mishra & De, 2024).

- **Activités agricoles** : L'usage intensif d'engrais phosphatés, de pesticides, et de boues d'épuration peut entraîner une contamination diffuse des sols agricoles par des métaux tels que le cadmium, le cuivre ou le zinc (Bradl, 2005 ; Mishra & De, 2024).

- **Activités minières** : L'exploitation des mines, notamment celles de métaux non ferreux, libère des métaux lourds qui peuvent persister longtemps dans les sols et les eaux environnantes. Par exemple, d'anciennes exploitations de mercure aux Philippines ont provoqué une pollution chronique affectant les écosystèmes locaux (Diwa et al.,2022)

• 1.1.3. Classification des métaux lourds

Les métaux lourds peuvent être classés selon leurs **propriétés biologiques, toxicologiques ou économiques** :

- **Métaux lourds toxiques** : Ce groupe comprend des métaux tels que **le mercure (Hg), le plomb (Pb), le cadmium (Cd), l'arsenic (As) et le chrome hexavalent (Cr⁶⁺)**. Ces éléments sont hautement toxiques, même à de très faibles concentrations, et n'ont aucune fonction biologique bénéfique connue. Ils sont associés à des risques sanitaires graves, notamment des cancers, des troubles neurologiques, des atteintes hépato-rénales et des troubles de la reproduction (Maftouh et al., 2024 ; Jain et al., 2024).
- **Métaux lourds essentiels** : Ce sont des éléments comme **le cuivre (Cu), le zinc (Zn) et le manganèse (Mn)**. Ils sont indispensables aux fonctions biologiques, notamment en tant que cofacteurs enzymatiques, mais deviennent toxiques à fortes concentrations (Shah, 2021 ; Tandel et al., 2024).
- **Métaux précieux** : Les éléments tels que **l'or (Au), l'argent (Ag) et le platine (Pt)** sont considérés comme précieux en raison de leur rareté et de leur valeur économique. Leur toxicité est généralement faible, mais l'extraction et le traitement de ces métaux peuvent engendrer des pollutions secondaires notables (Jaishankar et al., 2014).
- **Radionucléides** : Il s'agit de métaux radioactifs comme **l'uranium (U) et le thorium (Th)**. Bien que naturellement présents, ils présentent des risques importants pour la santé et l'environnement du fait de leur radioactivité et de leur persistance dans les milieux (Vengosh et al., 2022 ; Patel et al., 2022).

1.1.4. Caractéristiques des métaux lourds

Les métaux lourds constituent un groupe d'éléments aux propriétés physico-chimiques spécifiques, souvent caractérisés par une densité élevée, une persistance environnementale, une bioaccumulation et une toxicité potentielle pour les organismes vivants. Cette section présente les principales caractéristiques de quelques-uns des métaux lourds les plus préoccupants en écotoxicologie.

A. Le Mercure (Hg)

Le mercure est un métal lourd hautement toxique présentant des propriétés physico-chimiques et toxicologiques distinctes. Il peut exister sous plusieurs formes chimiques, chacune ayant un comportement environnemental et une toxicité spécifique.

- **Symbole et aspect** : Hg ; métal blanc argenté, brillant, liquide à température ambiante.
- **États chimiques** : Le mercure se présente sous trois formes principales :
 - **Élémentaire (Hg⁰)** : volatil, pénétrant principalement par inhalation.
 - **Inorganique (Hg⁺, Hg²⁺)** : souvent sous forme de sels.
 - **Organique (méthyl mercure CH₃Hg⁺)** : très toxique, présent dans la chaîne alimentaire aquatique (U.S.Environmental Protection Agency,2023).
- **État physique** : Liquide à température ambiante ; point de fusion : -38,83 °C ; point d'ébullition : 356,73 °C (Nabi, 2014).
- **Sources** : Emissions industrielles, incinération de déchets, combustion de charbon, amalgames dentaires, fruits de mer contaminés.
- **Voies d'exposition** : Inhalation des vapeurs, ingestion d'aliments contaminés, contact cutané.
- **Bioaccumulation** : Le méthylmercure s'accumule dans les tissus animaux, en particulier chez les prédateurs aquatiques, ce qui augmente le risque pour les humains (Mercury, 2023).
- **Mécanisme toxique** : Liaison aux groupes thiols (-SH) des protéines, entraînant des perturbations enzymatiques et des effets neurotoxiques (Mercury, 2022).
- **Effetssanitaires:**
 - Neurotoxicité : troubles cognitifs, moteurs, troubles du développement chez l'enfant.
 - Atteinte rénale, immunitaire et pulmonaire, potentiellement irréversible à forte exposition (Tchounwou et al.,2012)

B. L'Arsenic (As)

L'arsenic est un métalloïde naturellement présent dans l'environnement. Il est reconnu pour sa toxicité élevée et ses effets délétères sur la santé humaine, notamment en cas d'exposition chronique.

- **Symbole et aspect** : As ; métalloïde gris à l'état élémentaire (Stoytcheva&Zlatev, 2018).

- **Formes chimiques** : Oxydations +3 (arsénite) et +5 (arséniate) ; associé à des composés comme le sulfure d'arsenic (Nation Research Council, 1977 ; WHO/IARC,2012).

- **Sources:**

- Naturelles : roches, volcans, nappes phréatiques.

- Anthropiques : industrie minière, fonderies, pesticides.

- **Zones à risque** : Bangladesh, Inde, États-Unis.

- **Voies d'exposition** : Ingestion (eau/sols contaminés), inhalation (poussières industrielles), absorption cutanée.

- **Bioaccumulation** : Dans les tissus biologiques, surtout chez les plantes et animaux aquatiques ; transfert possible dans la chaîne alimentaire.

- **Interaction microbienne** : Modulation de la mobilité de l'arsenic par oxydation, réduction ou méthylation microbienne.

- **Mécanisme toxique** : Induction de stress oxydatif, interférence avec la réparation de l'ADN et inhibition enzymatique (Jomova & Valko, 2011; Hartwig, 2013; Huang et al., 2021).

- **Effets sanitaires** : cancers cutanés, pulmonaires et vésicaux ; maladies cardiovasculaires ; lésions neurodéveloppementales (ATSDR, 2007; IARC, 2012) .

- **C. Le Cuivre (Cu)**

Le cuivre est un oligo-élément essentiel, intervenant dans de nombreux processus enzymatiques, mais pouvant devenir toxique en excès.

- **Symbole et aspect** : Cu ; métal rouge-brun.

- **Formes chimiques** : Présent sous forme d'oxydes (CuO , Cu_2O) et de sulfures (CuS).
- **Sources** : Conduites d'eau, engrais, pesticides, aliments.
- **Voies d'exposition** : Ingestion, inhalation (fumées industrielles).
- **Bioaccumulation** : Principalement dans le foie et le cerveau.
- **Mécanisme de transport** : ATPases, métallochaperonnes (Møller&Aaseth, 2022).
- **Toxicité** : Induit un stress oxydatif, perturbe les membranes cellulaires.
- **Effets sur la santé** : Troubles gastro-intestinaux aigus, hépatotoxicité, atteintes neurologiques, anémie chronique (Gaetke et al., 2014; Karim, 2018).

D. Le Zinc (Zn)

Le zinc est un oligo-élément indispensable à de nombreuses fonctions métaboliques. Toutefois, une exposition excessive peut causer des déséquilibres physiologiques.

- **Symbole et aspect** : Zn ; blanc bleuâtre à éclat métallique.
- **Formes chimiques** : Présent dans les minerais sous forme de ZnS et ZnCO_3 .
- **Sources** : Sols, eaux usées industrielles, produits alimentaires.
- **Voies d'exposition** : Ingestion, inhalation, contact dermique.
- **Bioaccumulation** : Faible, mais peut affecter le métabolisme du cuivre en cas d'excès.
- **Toxicité** : Perturbe l'absorption du cuivre, induit un stress oxydatif.
- **Effets sur la santé** :
 - Carence : retards de croissance, altérations immunitaires.
 - Excès : nausées, vomissements, troubles respiratoires et cutanés (Shankar & Prasad, 1998; Johnson, 2025)

E. Le Plomb (Pb)

Le plomb est un métal lourd hautement toxique, encore très présent dans l'environnement malgré son interdiction progressive.

- **Symbole et aspect** : Pb ; bleu argenté, se ternissant en gris.
- **Formes chimiques** : Surtout en galène, ainsi que divers sels de plomb.
- **Sources** : Batteries, vieilles peintures, tuyauteries, émissions industrielles.
- **Voies d'exposition** : Inhalation, ingestion, contact cutané.
- **Bioaccumulation** : Accumulation dans les os et les tissus mous (foie, reins).
- **Toxicité** : Perturbe les enzymes hématiques et le développement cérébral.
- **Effets sanitaires** : Retards cognitifs, anémie, hypertension, troubles neurologiques graves chez l'enfant (Seema, 2013 ; Patočka&Kuca, 2016 ;Boldyrev, 2018).

F. Le Cadmium (Cd)

Le cadmium est un métal lourd très toxique, dérivé des activités minières et industrielles. Il présente une longue demi-vie biologique, rendant sa bioaccumulation problématique.

- **Symbole et aspect** : Cd ; poudre blanc argenté à reflets bleuâtres.
- **Formes chimiques** : Présent dans les minerais sulfurés, souvent associé au zinc.
- **Sources** : Engrais phosphatés, batteries, tabac, aliments contaminés.
- **Voies d'exposition** : Inhalation (10–50 % d'absorption), ingestion (5–10 %).
- **Bioaccumulation** : S'accumule dans les reins, foie et os, avec une demi-vie biologique de 10 à 30 ans (Järup et al., 1998 ; Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2022)
- **Mécanisme toxique** : Stress oxydatif, génotoxicité, inhibition enzymatique.
- **Effets sanitaires** : Néphrotoxicité, ostéomalacie, cancers (voies urinaires), troubles cardiovasculaires (Davidova et al., 2024).

1.1.5. Les propriétés physicochimiques des métaux lourds

Les métaux lourds sont caractérisés par un ensemble de propriétés physiques et chimiques qui déterminent leur comportement dans l'environnement ainsi que leur impact toxicologique. Ces propriétés, incluant leur densité élevée, leur stabilité chimique, leur réactivité, ainsi que leur capacité à s'accumuler dans les organismes vivants, en font des polluants particulièrement

préoccupants. Cette section décrit les principales propriétés physicochimiques des métaux lourds, en lien avec leur persistance dans l'environnement et leur potentiel de bioaccumulation.

1.1.5.1. Propriétés physiques

- **Densité et masse atomique** : Les métaux lourds possèdent une densité généralement supérieure à 5 g/cm^3 , ce qui constitue un critère fondamental dans leur classification. Leur masse atomique est également élevée, ce qui contribue à leur inertie relative. Des éléments tels que le plomb (Pb, $11,34 \text{ g/cm}^3$) ou le mercure (Hg, $13,55 \text{ g/cm}^3$) illustrent ces caractéristiques.

- **État physique à température ambiante** : À l'exception notable du mercure, qui est liquide à température ambiante, la majorité des métaux lourds se présentent sous forme solide dans des conditions environnementales normales.

- **Conductivité thermique et électrique** : Ces éléments sont en général de bons conducteurs de chaleur et d'électricité, en raison de la mobilité de leurs électrons de valence. Cette propriété justifie leur utilisation dans divers secteurs industriels (électronique, alliages, etc.), bien qu'elle contribue également à leur dissémination environnementale.

- **Point de fusion et d'ébullition** : Ils présentent des points de fusion et d'ébullition relativement élevés, ce qui influence leur volatilité et leur comportement dans les systèmes thermiques naturels et anthropiques.

1.1.5.2. Propriétés chimiques

- **Réactivité chimique** : Les métaux lourds peuvent former divers composés inorganiques ou organométalliques selon leur environnement. Par exemple, le plomb réagit avec l'oxygène pour former des oxydes toxiques (PbO , Pb_3O_4), tandis que le mercure peut former des composés organomercuriels particulièrement dangereux.

- **Toxicité** : De nombreux métaux lourds, tels que le cadmium (Cd), l'arsenic (As), et le plomb (Pb), sont toxiques même à faibles concentrations. Ils interfèrent avec les processus biologiques en se liant aux groupes sulfhydryles (-SH) des enzymes, inhibant

ainsi leur fonctionnement et entraînant des effets génotoxiques, cancérigènes ou neurotoxiques (Kul et al., 2023).

- **Persistance et non-biodégradabilité** : Contrairement aux composés organiques, les métaux lourds ne peuvent pas être dégradés biologiquement, ce qui explique leur persistance à long terme dans les milieux naturels.

- **Bioaccumulation** : Ces éléments ont la capacité de s'accumuler dans les tissus biologiques au fil du temps. Cette accumulation, souvent irréversible, peut provoquer des effets chroniques, surtout dans les réseaux trophiques aquatiques (EPA, 2000 ; Ray & Vashishth, 2024)

-

- **1.1.5.3. Origines et implications environnementales**

- **Sources anthropogéniques** : Les principales sources humaines de métaux lourds incluent l'industrie métallurgique, les mines, la combustion de combustibles fossiles, l'utilisation de fertilisants et de pesticides contenant des métaux, ainsi que le rejet des eaux usées domestiques et industrielles (Hassan et al., 2010 ; Aithani&Kushawaha, 2023).

- **Sources géogéniques** : Les processus naturels tels que l'érosion des roches, les éruptions volcaniques ou encore la dissolution des minéraux métallifères contribuent également à la libération des métaux dans l'environnement (Ray & Vashishth, 2024)

- **Contamination de l'eau et du sol** : Une accumulation excessive de métaux lourds a été observée dans les sédiments et les sols agricoles, ainsi que dans les cours d'eau situés à proximité de zones industrielles, dépassant fréquemment les seuils de sécurité établis par les instances sanitaires et environnementales (Kazim&Kadhum, 2022 ;Anderson & Duke, 2023).

- **Mobilité environnementale** : La solubilité, l'adsorption sur les particules du sol et la précipitation sous forme de sels influencent la mobilité des métaux lourds dans l'environnement. Cette mobilité est modulée par des facteurs abiotiques tels que le pH, la température, la texture du sol et la présence de complexants organiques ou inorganiques.

1.1.6. Concentration des métaux lourds dans les produits laitiers

Le lait est une substance biologique complexe et hautement nutritive, jouant un rôle fondamental dans la croissance, le développement et le maintien de la santé humaine à toutes les étapes de la vie. Il est reconnu comme un aliment quasi complet, en raison de sa richesse en macronutriments (protéines, lipides, glucides) et micronutriments (vitamines et minéraux essentiels tels que Ca, K, P, Zn, Fe, Cu et Se) (Buldini et al., 2002). Toutefois, en dépit de ses nombreux bienfaits, le lait et ses dérivés peuvent également constituer une source d'exposition aux métaux lourds, qui s'y retrouvent à des concentrations variables, parfois préoccupantes pour la santé humaine (Qin et al., 2009).

1.1.6.1. Origines de la contamination

La contamination des produits laitiers par les métaux lourds peut survenir à différentes étapes de la chaîne de production :

- **Au niveau de l'élevage**, par l'ingestion de fourrages, d'eau ou d'aliments contaminés par des rejets industriels ou agricoles ;
- **Durant la transformation**, à travers les équipements, les additifs ou les conditions de traitement ;
- **Lors du conditionnement**, par la migration de métaux à partir des matériaux d'emballage (Ayar et al., 2009).

Des recherches, telles que celle de Bakircioglu et al. (2011), ont mis en évidence la présence de plusieurs métaux lourds – notamment Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se et Zn – dans des fromages emballés dans différents types de matériaux (plastique, fer-blanc). Les résultats montrent que la concentration de ces éléments varie significativement selon la nature du fromage et le type d'emballage utilisé, mettant en lumière l'impact des pratiques de transformation et de conservation sur la contamination finale.

1.1.6.2. Concentrations rapportées dans différentes régions

Plusieurs études menées à travers le monde ont documenté les niveaux de métaux lourds dans le lait et ses produits dérivés. Ces concentrations varient en fonction de nombreux facteurs environnementaux, géographiques et technologiques :

- **Plomb (Pb)** :

Présent dans de nombreux produits laitiers, parfois à des niveaux excédant les normes de sécurité.

- En Italie (Latium), Battisti et al. (2024) rapportent que seulement 11,3 % des échantillons analysés respectaient les seuils réglementaires.
- À Bassorah (Irak), des dépassements significatifs des limites fixées par l'OMS ont été enregistrés (Al-Garory & Al-Kaabi, 2020).
- En Égypte, Saleh et al. (2019) indiquent que les concentrations mesurées excédaient l'apport quotidien tolérable.

- **Cadmium (Cd)** :

- Détecté à des niveaux élevés en Égypte (Saleh et al., 2019).
- Aucun Cd n'a été détecté dans les échantillons de lait analysés à Bassorah (Al-Garory & Al-Kaabi, 2020), révélant une variabilité régionale importante.

- **Nickel (Ni)** :

- En Égypte, des concentrations jugées sûres ont été relevées.
- Toutefois, des niveaux allant de 1,233 à 1,677 ppm ont été rapportés par Ray & Vashishth, (2024), suggérant un risque potentiel selon le contexte géographique.

- **Autres métaux** :

- Le fer (Fe) et le cuivre (Cu) ont été retrouvés à des concentrations élevées dans certaines études (Al-Garory & Al-Kaabi, 2020), bien qu'ils soient également des nutriments essentiels.
- Le chrome (Cr), quant à lui, présente une occurrence variable, étant détecté dans certaines études (Abidin et al., 2021) et absent dans d'autres (Saleh et al., 2019).

1.1.6.3. Implications sanitaires

La présence de métaux lourds dans les produits laitiers soulève des préoccupations majeures, notamment en raison de leur toxicité cumulée, de leur persistance biologique et de leur effet néfaste sur la santé humaine, surtout chez les groupes sensibles comme les nourrissons, les enfants et les femmes enceintes. Les risques incluent des effets neurologiques, hépatiques, rénaux, voire carcinogènes selon la nature et la concentration du métal impliqué.

Ainsi, la surveillance rigoureuse de la concentration des métaux lourds dans les produits laitiers s'impose comme une nécessité de santé publique. Il est essentiel de renforcer les contrôles à toutes les étapes de la chaîne de production – de l'alimentation animale jusqu'à l'emballage – et d'appliquer des normes strictes de sécurité alimentaire pour prévenir l'exposition chronique des consommateurs à ces éléments toxiques.

CHAPITRE II: MATHERIELS ET METHODES

1. Présentation de la région d'étude

1.1. Situation géographique de la wilaya de Skikda

La wilaya de Skikda est située dans le nord-est de l'Algérie, en bordure de la mer Méditerranée, avec un littoral s'étendant sur environ 120 kilomètres. Elle est délimitée au nord par la mer, au sud par les wilayas de Mila et Constantine, à l'est par celle d'Annaba, et à l'ouest par la wilaya de Jijel. Sa superficie est d'environ 4 137 km² et elle présente une grande diversité de reliefs, comprenant des zones côtières, des plaines fertiles ainsi que des chaînes montagneuses. Cette hétérogénéité géographique influe directement sur les conditions environnementales ainsi que sur les dynamiques socio-économiques de la région (Figure 1).

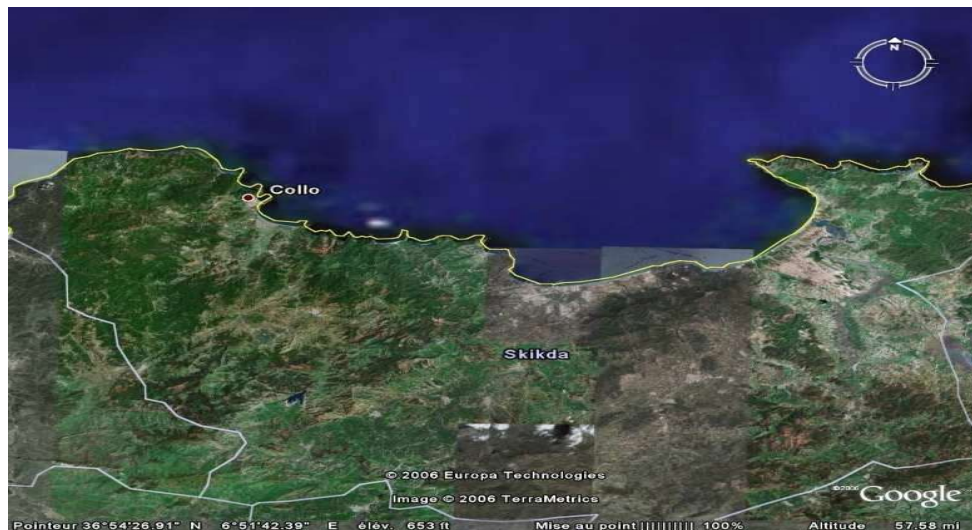


Figure1 : Localisation géographique de la wilaya de Skikda

(Image satellite,googleEarth)

1.1.1. Climatologie générale de la région

La wilaya de Skikda se caractérise par un climat de type méditerranéen, marqué par des étés chauds et secs et des hivers frais et humides. Ce régime climatique exerce une influence directe sur les écosystèmes terrestres et marins de la région.

• Précipitations :

Les précipitations sont principalement concentrées entre les mois de décembre et mars, avec un maximum enregistré en décembre (129,37 mm). En revanche, les mois de juillet et août sont les plus secs, avec des cumuls inférieurs à 10 mm. Cette forte variation saisonnière impacte l'écoulement des eaux de surface ainsi que la recharge des nappes phréatiques.

• Températures :

Les températures moyennes varient de manière significative au cours de l'année. Le mois le plus chaud est août, avec une température moyenne de 26,37 °C, tandis que le mois le plus froid est février, avec 12,81 °C. L'amplitude thermique annuelle reste modérée, caractéristique du climat méditerranéen.

• Humidité :

L'humidité relative moyenne oscille entre 67,7 % en octobre et 73,86 % en mars. Ce niveau d'humidité favorise le développement d'une végétation relativement dense, en particulier durant les saisons hivernale et printanière.

• Vent:

La vitesse moyenne du vent varie entre 3,1 m/s et 3,7 m/s, avec des valeurs maximales généralement enregistrées en hiver (janvier, février et décembre). Le vent joue un rôle important dans la dynamique côtière et la dispersion des polluants atmosphériques.

• **Variations climatiques mensuelles à Skikda (2010–2024) :**

Les données recueillies à la station météorologique de Stora entre 2010 et 2024 confirment le caractère méditerranéen du climat de Skikda. Les températures estivales sont modérées à élevées, atteignant un maximum d'environ 26 °C en août, tandis que les températures hivernales descendent jusqu'à 12,4 °C en janvier. Les précipitations sont abondantes en hiver, notamment en décembre (112 mm), et très faibles en été, particulièrement en juillet (6,4 mm). Ces variations traduisent une forte saisonnalité climatique caractéristique de la région.

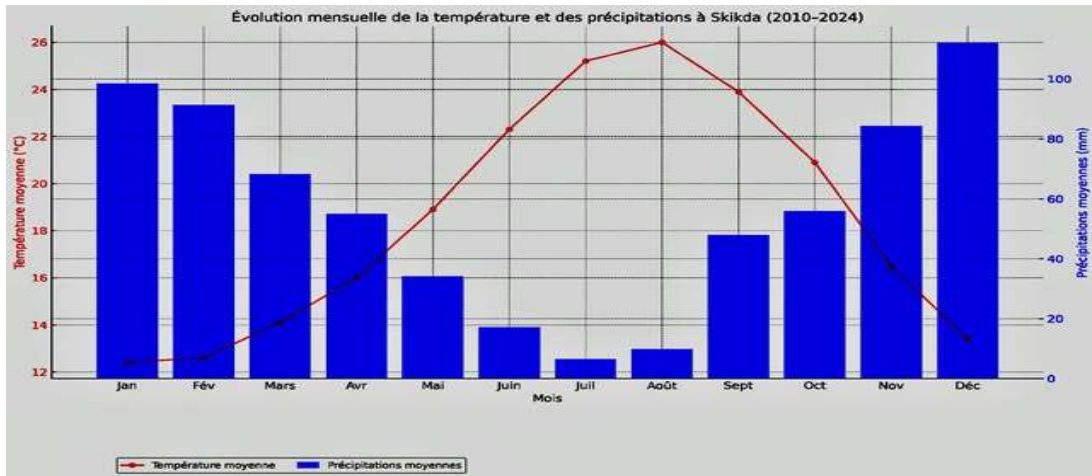


Figure 02 : Variations mensuelles de la température et des précipitations à Skikda(2010–2024) (Station météorologique de Stora– Skikda 2024)

1.2. Situation géographique et choix des sites d'étude

Les sites sélectionnés pour cette étude sont situés dans la wilaya de Skikda, au nord-est de l'Algérie. Cette région présente une grande diversité géographique, allant des zones rurales agricoles et montagneuses aux zones périurbaines à caractère industriel. Dans le but d'évaluer l'impact potentiel de la pollution environnementale sur la qualité du lait cru, deux types de milieux ont été comparés :

- **Zone potentiellement polluée** exposées à des sources anthropiques de contamination ;
- **zone considérées comme non polluée**, caractérisées par un environnement naturel relativement préservé.

1.2.1. Zone potentiellement polluée : Commune de Hammoudi Hamrouch

Située au sud-est de la wilaya de Skikda, à environ 20 km du chef-lieu, cette commune relève administrativement de Hammadi Krouma. Elle est bordée par :

- Hammadi Krouma (nord),
- Filfila (est),
- Ouled Hebaba (sud),
- Skikda (ouest).

La zone se trouve à proximité immédiate d'installations industrielles majeures, notamment une unité de la compagnie nationale Sonatrach et la zone industrielle de Skikda. En raison de cette exposition directe à une pollution industrielle potentielle, notamment en métaux lourds, ce site a été classé comme zone polluée (Figure 3).

1.2.2. Zone non polluée (témoin) : Commune de Bin El Ouiden

Située dans la daïra de Tamalous, la commune de Bin El Ouiden est délimitée comme suit :

- **Au nord** : les communes de Kerkeria et Beni Zid
- **Au sud** : la commune de Oum Toub
- **À l'est** : la commune de Tamalous
- **À l'ouest** : la commune de Aïn Kechra

Il s'agit d'une région montagneuse éloignée de toute source industrielle ou urbaine majeure, cette zone a été retenue comme milieu naturel témoin non pollué, idéal pour établir une base de comparaison (Figure 4).

2. Échantillonnages

2.1. Choix des sites d'échantillonnage

Évaluation de la pollution par les métaux lourds dans le lait de vache produit dans différentes zones d'élevage de la région de Skikda

Conformément aux objectifs de l'étude, deux sites d'échantillonnage ont été sélectionnés pour permettre une comparaison entre des milieux **pollués** et **non pollués**, répartis comme suit :

Tableau 01 : Caractéristiques des sites d'échantillonnage sélectionnés

Type de site	Localisation	Justification principale
Zone polluée n°1	Hammoudi Hamrouch	Proximité immédiate d'industries (Sonatrach)
Zone non polluée n°1	Bin El Ouiden	Zone rurale isolée, à activité agricole

Un total de **16 échantillons de lait cru** a été prélevé :

- **8 échantillons dans la zone polluée,**
- **8 échantillons dans la zone non polluée,**

dans le but d'évaluer l'influence éventuelle de la pollution environnementale sur la qualité sanitaire du lait produit localement.



Figure3: Hammoudi Hamrouch



Figure4: Bin El Ouiden

2.2. Méthodologie de prélèvement et conditions de conservation

La campagne d'échantillonnage a été menée au cours du mois de mai, sur une période de deux journées consécutives, par deux équipes réparties sur les différents sites d'étude.

• **Prélèvement des échantillons**

Dans chaque ferme visitée, le lait cru a été prélevé directement sur l'ensemble des vaches disponibles au moment du passage. Chaque échantillon a été collecté dans un flacon stérile, préalablement étiqueté avec un code d'identification unique correspondant à sa zone géographique d'origine (Figure 5). Une fois prélevés, les échantillons ont été laissés à température ambiante pendant un court laps de temps afin de permettre un léger refroidissement, avant d'être hermétiquement fermés. Ils ont ensuite été placés dans des glacières isothermes afin de maintenir la chaîne du froid pendant toute la durée du transport.

• **Transport et conservation**

Immédiatement après le prélèvement, tous les flacons ont été conservés dans des glacières portables contenant des accumulateurs de froid, dans le but de limiter toute dégradation physico-chimique ou biologique.

Les échantillons ont été maintenus dans ces conditions jusqu'au lendemain, puis transférés au laboratoire universitaire pour analyse. À leur arrivée, ils ont été stockés dans un réfrigérateur à température contrôlée, assurant la conservation optimale des échantillons et la stabilité des paramètres analytiques, en attendant la suite des étapes expérimentales (Figure 6) .



Figure 5 : Prélèvement des échantillons

(Photo originale 2025).



Figure 6 : Transport des échantillons

(Photo originale 2025).

3. Protocole au niveau du laboratoire

Lors des travaux expérimentaux réalisés en laboratoire, une série de matériels et d'équipements a été utilisée pour assurer la précision et la fiabilité des analyses. Les instruments employés sont listés ci-dessous :

- **Matériel de prélèvement et de préparation :**

- Flacons stériles pour le prélèvement du lait
- Fioles jaugées de 50 mL
- Entonnoirs
- Pipettes volumétriques
- Papier filtre
- Tubes de stockage hermétiques
- Eau distillée
- Acide nitrique (HNO_3) concentré à 65 %

- **Appareils utilisés:**

- Plaque chauffante (Figure 7)
- Four à moufle (Figure 8)
- Hotte à flux laminaire (Figure 9)
- Spectromètre d'absorption atomique à flamme SAAF (Figure 10).

Ces instruments ont été essentiels pour la préparation, la digestion acide, la conservation et l'analyse des échantillons de lait cru dans le cadre de l'évaluation des concentrations en éléments traces métalliques.



Figure 7: plaque chauffante
(Photo originale 2025)



Figure 8 : four a moufle
(Photo originale 2025)



Figure 9: Hotte à flux laminaire
(Photo originale 2025).



Figure 10 : SAAF

3.1. Traitement des matériaux avant usage

Afin de prévenir tout risque de contamination susceptible d'influencer les résultats analytiques, un protocole rigoureux de préparation et de décontamination des matériaux a été appliqué avant chaque utilisation (Figure 10).

- **Nettoyage à l'eau distillée:**

Tous les matériaux de laboratoire ont d'abord été soigneusement lavés à l'eau distillée afin d'éliminer les impuretés superficielles et les résidus éventuels.

- **Rinçage à l'acide nitrique (HNO₃):**

Après le lavage initial, les instruments ont été rincés avec une solution d'acide nitrique concentré (HNO₃ à 65 %) dans le but d'éliminer toute trace de contaminants métalliques susceptibles d'interférer avec les analyses.

- **Nettoyage systématique après chaque manipulation :**

Ce processus de nettoyage a été répété de manière systématique après chaque utilisation, garantissant ainsi une absence de contamination croisée entre les échantillons.

- **Séchage avant utilisation :**

Avant leur réutilisation, tous les matériaux ont été soigneusement séchés à l'air libre dans un environnement propre, afin d'éviter toute réaction chimique indésirable liée à l'humidité résiduelle.

L'ensemble de ces étapes a permis de maintenir des conditions expérimentales strictement contrôlées, condition essentielle à la fiabilité et à la reproductibilité des résultats analytiques.



Figure 11 : Stérilisation du matériel de travail (Photo originale 2025).

3.2. Préparation des échantillons

Après le prélèvement de 16 échantillons de lait cru, ceux-ci ont été conservés au congélateur jusqu'à leur minéralisation au niveau du laboratoire, afin de préserver leur intégrité physico-chimique.

À leur arrivée au laboratoire, et après la préparation du matériel nécessaire, la procédure de traitement des échantillons a été menée selon les étapes suivantes (Figure 12):

1. Attribution des fioles :

À chaque échantillon a été attribuée une fiole jaugée de 50 mL, portant le même numéro d'identification que le flacon de prélèvement initial, afin d'assurer une traçabilité rigoureuse tout au long du processus analytique.

2. Transfert du lait :

À l'aide d'une pipette stérile, un volume de 10 mL de lait cru a été transféré dans la fiole jaugée correspondante, en veillant à minimiser toute forme de contamination externe.

3. Ajout d'acide nitrique :

Un volume de 10 mL d'acide nitrique concentré (HNO_3 à 65 %) a ensuite été ajouté à chaque fiole. Cette étape vise à réaliser une digestion acide, permettant de décomposer la matière organique et de libérer les éventuels métaux lourds présents sous forme liée ou complexée.

Ce protocole de préparation constitue une étape essentielle avant la phase de digestion thermique, en vue d'une analyse ultérieure par spectrométrie d'absorption atomique.

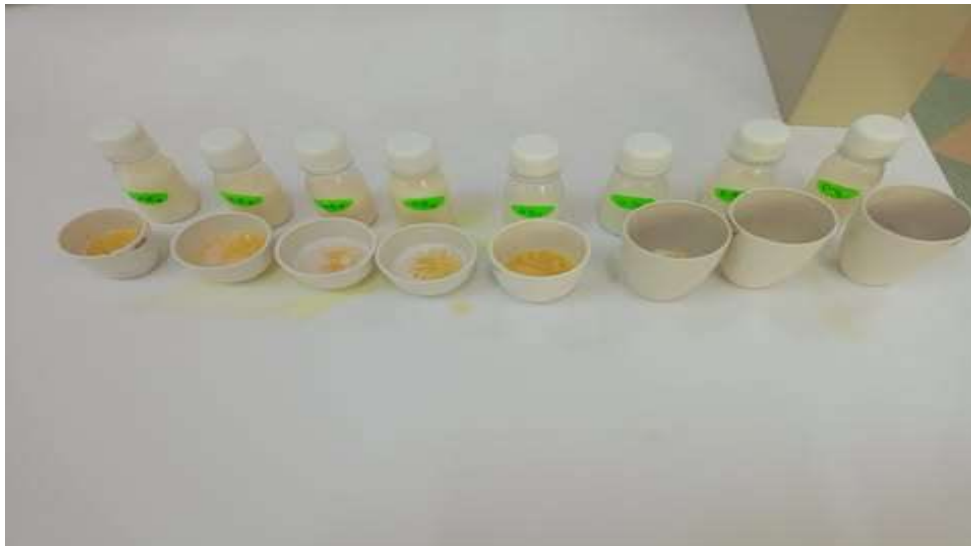


Figure 12 : la préparation des échantillons de lait (Photo originale 2025).

3.3. Minéralisation des échantillons

Afin de déterminer la teneur en éléments traces métalliques dans le lait cru, les échantillons subissent d'abord un séchage puis une minéralisation. Cette dernière consiste à dégrader la matière organique par digestion acide, libérant ainsi les métaux potentiellement présents. L'acide nitrique concentré (HNO_3 à 65 %) est le réactif retenu pour cette digestion.

3.4. Protocole expérimental de la minéralisation

Pour cette étude, la minéralisation par voie sèche a été adoptée. Elle poursuit trois objectifs :

1. **Ioniser** les métaux afin de les rendre analysables ;
2. **Éliminer** l'effet perturbateur des substances organiques (notamment les protéines) susceptibles d'interférer avec les mesures ;
3. **Concentrer** les métaux pour faciliter leur détection par spectrométrie d'absorption atomique.

Le protocole se déroule en trois étapes : séchage, calcination et mise en solution.

3.4.1. Séchage des Échantillons

Dans le cadre de la préparation des échantillons de lait pour les analyses ultérieures, une étape de séchage a été réalisée afin d'éliminer toute trace d'humidité pouvant interférer avec les résultats analytiques.

Le séchage a été effectué sur une plaque chauffante à une température de 120 °C pendant une durée de deux heures. Cette température a été choisie pour permettre une évaporation complète de l'eau sans altérer les constituants sensibles du lait. Le séchage est considéré comme terminé lorsque l'échantillon devient complètement sec, prêt à être soumis aux étapes analytiques suivantes telles que la minéralisation (figure 13)



Figure 13 : Séchage des échantillons (Photo originale 2025).

3.4.2. Calcination

Les échantillons secs sont immédiatement introduits dans un four à moufle à 500 °C pendant 4 h(Figures 14).

Cette température permet l'élimination complète de la matière organique, ne laissant que les résidus minéraux sous forme de cendres. À la fin du temps de calcination, les creusets ont été retirés du four et laissés à refroidir à température ambiante afin d'éviter tout risque de condensation ou de réaction avec l'air ambiant. Le résidu obtenu correspond aux cendres minérales contenant les métaux d'intérêt.



Figure 14 : Réduction des échantillons en cendre (Photo originale 2025).

3.5. Filtration et mise en solution :

1. Dissolution des cendres

- Chaque cendrier est rincé dans une fiole jaugée de 50 mL contenant 9,5 mL d'eau distillée et 0,5 mL d'acide nitrique concentré.
- Le mélange est homogénéisé à l'aide d'une baguette inertée (Figure 15) jusqu'à dissolution complète.

2. Filtration

- La solution est filtrée sur papier filtre pour éliminer les particules non dissoutes (Figure 16).
- Le filtrat clair est recueilli dans des tubes en verre stériles et étiquetés.

3. Conservation

- Les tubes sont conservés à 4 °C, à l'abri de la lumière, jusqu'à l'analyse par spectrométrie d'absorption atomique à flamme SAA, destinée à quantifier les concentrations en métaux lourds.

Ce protocole rigoureux assure la fiabilité et la reproductibilité des résultats analytiques, indispensables à l'évaluation précise de la contamination métallique du lait cru.



Figure 15 : Homogénéisation du mélange

(Photo originale 2025).



Figure 16 : Filtration des échantillons

(Photo originale 2025).

3.6. Analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique.

Le dosage des métaux étudiés (Pb, Cu, Fe et Zn) est réalisé par la spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme (SAA) au niveau du laboratoire central de l'ONA (office national d'assainissement) d'Alger.

3.6.1. Définition.

La spectrophotométrie d'absorption atomique est une méthode analytique permettant de déterminer la concentration d'une substance par l'absorption d'une radiation spécifique à l'élément chimique contenu dans la substance.

3.6.2. Principe.

Proposée par (WALSH, 1955), la spectrophotométrie d'absorption atomique est une méthode d'analyse quantitative s'adressant essentiellement aux métaux. Elle est basée sur la

propriété des atomes de l'élément qui peuvent absorber des radiations de longueur d'onde déterminée.

La solution de l'élément à analyser est nébulisée dans une flamme, ce qui provoque successivement l'évaporation du solvant, la vaporisation de l'élément sous forme de combinaisons chimiques, la dissociation de ces combinaisons avec production d'atomes libres à l'état fondamental.

4. Indices de pollution calculée:

4.1. Indice de pollution (PI - Pollution Index)

Il permet d'évaluer la pollution d'un échantillon par rapport à une valeur seuil réglementaire (par exemple, les normes fixées par la FAO, l'OMS ou le Codex Alimentarius).

Formule :

$$PI = \frac{C_i}{S_i}$$

- C_i = concentration du métal mesurée dans le lait
- S_i = concentration seuil tolérée pour ce métal

Interprétation:

- $PI < 1$: niveau non pollué
- $PI = 1$: niveau critique
- $PI > 1$: niveau pollué

4.2. Indice de charge métallique (MetalLoad Index, MLI ou LI)

C'est la moyenne arithmétique des ratios PI pour tous les métaux analysés dans un échantillon.

Formule :

$$MLI = \frac{\sum_{i=1}^n PI_i}{n}$$

Utilité : permet de comparer globalement la charge métallique entre les zones.

4.3. Dose journalière estimée (EDI)

C'est la quantité de métal consommée par jour via l'ingestion du lait.

Formule:

$$EDI = \frac{Ci \times IR}{BW}$$

- C_i : concentration du métal dans le lait (mg/kg)
- IR : ingestion rate (quantité de lait consommée par jour, ex : 0.5 L ou 500 g pour un adulte)
- BW : poids corporel (ex : 60 kg pour un adulte, 30 kg pour un enfant)

4.4. Indice de risque sanitaire (Health Risk Index, HRI)

Évalue le risque lié à la consommation du lait contaminé par un métal pour un adulte ou un enfant.

Formule :

$$HRI = \frac{EDI}{RfD}$$

- EDI = dose journalière estimée (Estimated Daily Intake)
- RfD = dose de référence (dose admissible sans effet, donnée par l'EPA ou OMS)

4.5. Indice de contamination (Contamination Factor, CF)

Pour chaque métal :

Formule :

$$CF = \frac{C_i}{C_b}$$

$$CF = \frac{C_i}{C_b}$$

- C_b = concentration de fond ou normale attendue (valeur de référence naturelle ou seuil réglementaire)

CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSION

Dans le cadre de cette étude, une analyse a été menée sur les concentrations de cinq métaux lourds (Fer, Plomb, Cuivre, Cadmium, et le Chrome) présents dans le lait cru collecter dans différentes zones de la wilaya de Skikda. Au total, 16 échantillons ont été prélevés, répartis équitablement entre deux types de zones : huit provenant de régions Hammoudi Hamrouche considérées comme polluées et huit de Bin El Ouiden jugés non pollués. L'objectif de cette investigation est d'évaluer l'impact potentiel de la pollution environnementale sur la qualité sanitaire du lait produit localement, en mettant en évidence d'éventuelles différences significatives entre les zones étudiées.

1. Analyse comparative des concentrations en métaux lourds

Le tableau ci-dessus présente les concentrations moyennes des cinq métaux lourds (Fe, Pb, Cu, Cd, Cr) analysés dans le lait cru, accompagnées de leur écart-type ainsi que des valeurs minimales et maximales observées, dans deux types de zones : polluées et non polluées.

Tableau 02 : Variation de la concentration en métaux lourds dans le lait cru entre les 2 zones polluées et non polluées (la concentration des métaux lourds en Mg/L).

Élément	Zone polluée (n=8)	Zone non polluée (n=8)
Fer (Fe)	2.53± 0.38 [1.97 - 3.01]	1,2.41 ± 0.37 [1.87 - 2.80]
Plomb (Pb)	0.43 ± 0.11 [0.26 - 0.59]	0.14 ± 0.02 [0.09 - 0.17]
Cuivre (Cu)	0.49 ± 0.08 [0.37 - 0.61]	0.34 ± 0.11 [0.18 - 0.47]
Cadmium (Cd)	0.10 ± 0.01 [0.09 - 0.12]	0.05 ± 0.02 [0.02 - 0.09]
Chrome (Cr)	0.11 ± 0.02 [0.07 - 0.13]	0.06 ± 0.01 [0.05 - 0.07]

Les données sont présentées en Moyenne ± Écart-type
Le minimum et le maximum sont présentés entre les 2 crochets
n : le nombre d'échantillons

L'analyse des résultats révèle que le **fer (Fe)** est le **métal le plus prévalent** dans le lait cru, aussi bien en zone polluée (figure 17) ($2,53 \pm 0,38$ mg/L) qu'en zone non polluée ($2,41 \pm 0,37$ mg/L)(Figure 18) .Sa concentration est nettement supérieure à celle des autres métaux étudiés, ce qui reflète probablement sa présence naturelle dans l'environnement et sa capacité à se retrouver plus facilement dans la chaîne alimentaire.

En comparant les deux zones, on observe une **élévation systématique des concentrations moyennes de tous les métaux lourds dans la zone polluée** :

- Le **plomb (Pb)** montre une différence particulièrement marquée : sa concentration est environ trois fois plus élevée en zone polluée ($0,43 \pm 0,11$ mg/L) qu'en zone non polluée ($0,14 \pm 0,02$ mg/L), ce qui en fait un indicateur fort de contamination environnementale.
- Des tendances similaires sont observées pour le cuivre (Cu), le cadmium (Cd) et le chrome (Cr), dont les niveaux sont significativement plus élevés dans la zone polluée que dans la zone non polluée, bien que leurs concentrations restent inférieures à celles du fer.

Ces données confirment que la pollution environnementale influence directement la présence des métaux lourds dans le lait cru. Le fer reste le métal dominant, mais les métaux toxiques comme le plomb, le cadmium et le chrome présentent des différences significatives entre les deux zones, mettant en évidence un risque potentiel accru pour la santé publique dans les zones exposées à des sources de pollution. Ces résultats soulignent l'importance d'un contrôle régulier de la qualité du lait, en particulier dans les zones à proximité d'activités industrielles.

Évaluation de la pollution par les métaux lourds dans le lait de vache produit dans différentes zones d'élevage de la région de Skikda

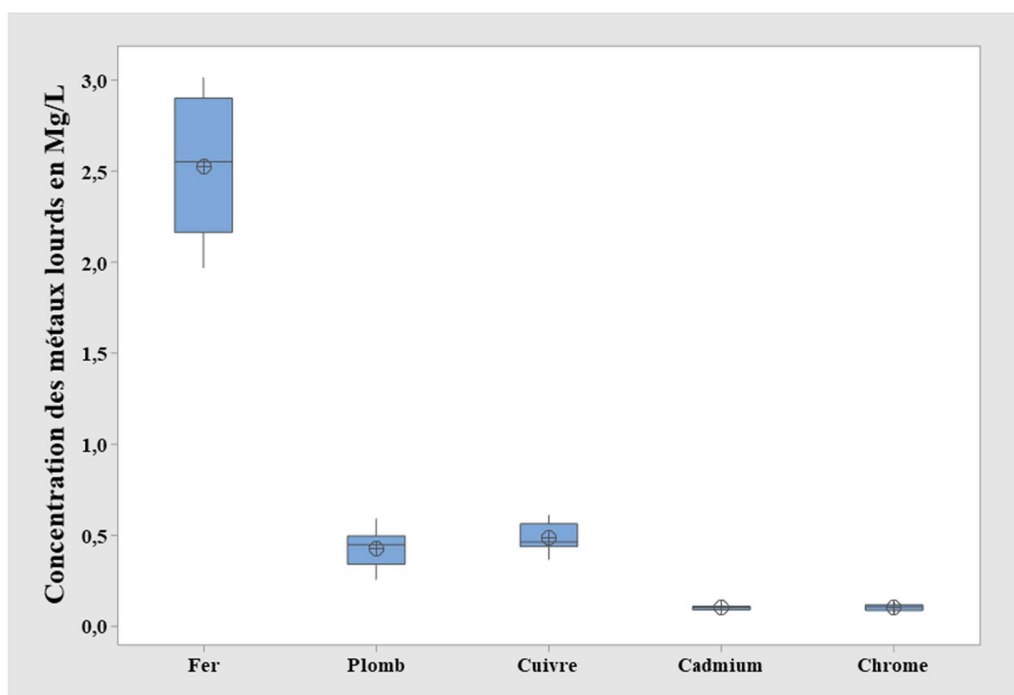


Figure 17 : Variation de la concentration en métaux lourds (en mg/L) dans la zone polluée

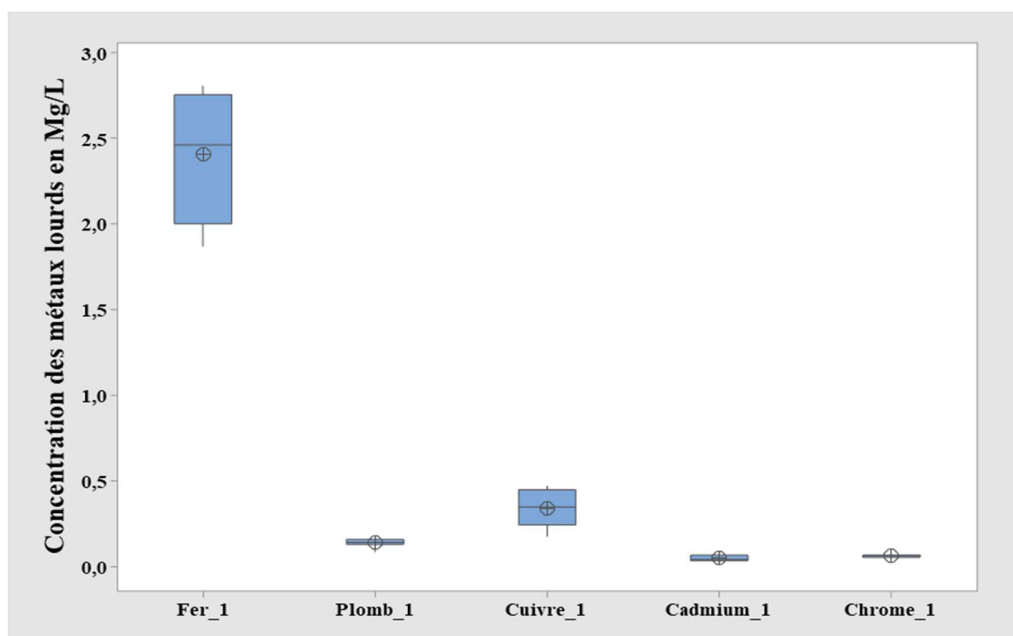
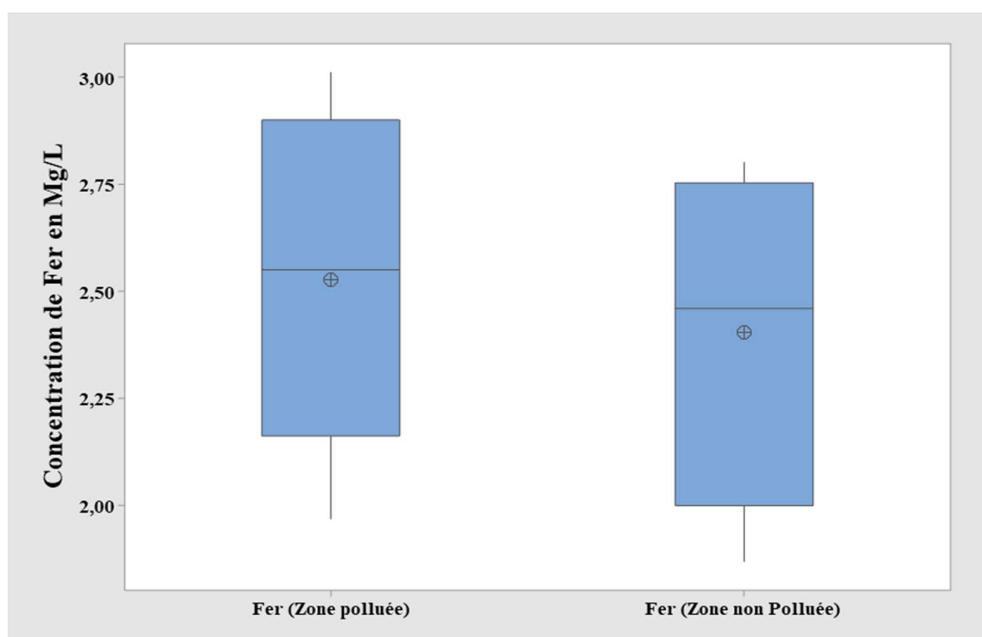


Figure 18 : Variation de la concentration en métaux lourds (en mg/L) dans la zone non polluée

2. Variations des concentrations pour chaque métal

2.1. Le Fer

La figure (19) présente une variation des concentrations de fer dans les deux zones échantillonnées (zones polluée et non polluée). Malgré une concentration plus élevée de fer dans la zone polluée dans certaines mesures, l'analyse statistique n'indique aucune différence significative (ANOVA : $F= 0,42$; $p\text{-value} = 0,53$). La $p\text{-value}$ supérieure à 0,05 indique qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les concentrations moyennes de fer dans le lait cru des fermes situées en zone polluée et celles en zone non polluée. Autrement dit, le niveau de fer observé pourrait être dû au hasard ou à des variations naturelles, et non à une exposition environnementale spécifique.



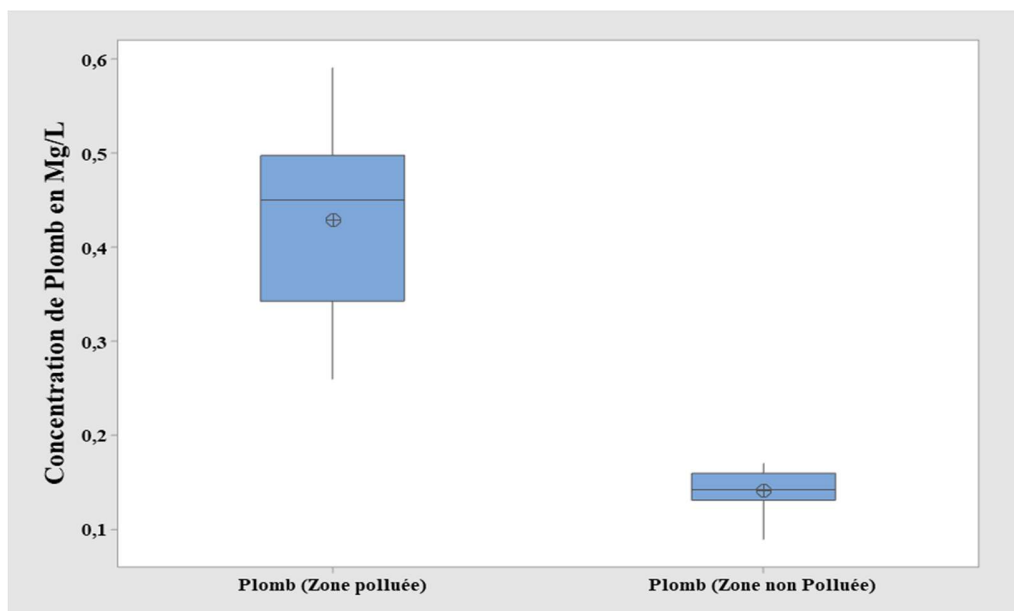
Figures 19 : Variation des concentrations de fer en mg/L dans les deux zones échantillonnées.

Le fer, bien qu'étant le métal le plus abondant dans cette étude, ne présente pas une différence significative entre les deux zones. Ce constat est en accord avec certaines recherches antérieures. Boularbah et al. (2006) au Maroc ont trouvé que le fer est présent naturellement dans le sol et peut se retrouver dans les produits laitiers sans lien direct avec la pollution anthropique.

Abou-Arab (1999), en Égypte, a rapporté que les concentrations de fer dans le lait pouvaient varier selon l'alimentation animale (fourrages riches en fer) plus que selon la pollution industrielle. En Algérie, une étude de Bouzidi et al. (2018) dans la région d'Annaba a également montré une teneur en fer élevée dans le lait cru, mais sans corrélation directe avec la pollution, contrairement au plomb ou au cadmium. Cela peut s'expliquer par le fait que le fer est un oligo-élément essentiel, naturellement présent dans l'alimentation des animaux, et donc plus susceptible de refléter des sources nutritionnelles que des sources de contamination.

2.2. Le Plomb (Pb)

La figure (20) présente une variation des concentrations de plomb dans les deux zones échantillonnées (zones polluée et non polluée). L'analyse statistique indique qu'il existe une différence hautement significative entre les concentrations moyennes de plomb dans le lait cru des zones polluée et non polluée ($F = 55,89$; $P < 0,001$). Le plomb est donc fortement associé à l'exposition environnementale, probablement liée aux sources industrielles ou urbaines dans la zone polluée de Skikda.



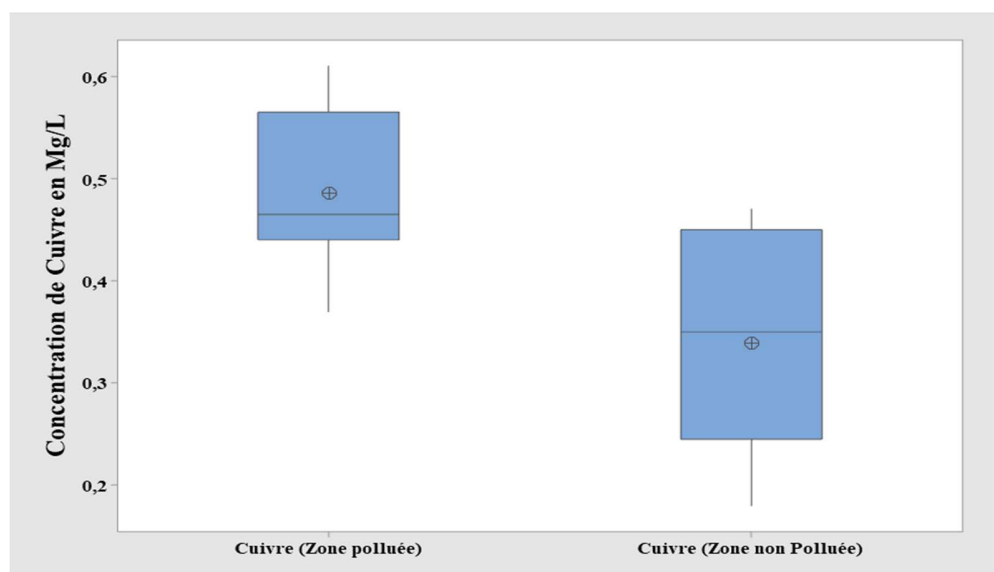
Figures 20 : Variation des concentrations du Plomb en mg/L dans les deux zones échantillonnées

En Algérie, Une étude menée à Annaba par Bouzidi et al. (2018) a mis en évidence des teneurs élevées en plomb dans le lait cru collecté à proximité des zones industrielles, dépassant parfois les normes internationales. Les auteurs attribuent cela à la contamination des sols, de l'eau et de l'alimentation animale. Khelil et al. (2016) à Blida ont également signalé des concentrations préoccupantes de plomb dans le lait de vache dans des zones proches des routes et de zones industrielles, ce qui corrobore les résultats de Skikda. En Inde, Patra et al. (2008) ont observé des niveaux élevés de plomb dans le lait des bovins vivant à proximité de zones industrielles, confirmant que l'environnement est un vecteur majeur de contamination. Une étude en Égypte par Abou-Arab (1999) a rapporté que les teneurs en plomb dans le lait cru pouvaient dépasser les seuils de sécurité, notamment à proximité de zones agricoles utilisant des pesticides ou d'axes routiers très fréquentés. Les résultats obtenus à Skikda confirment les données de la littérature : le plomb est un excellent marqueur de pollution anthropique. Sa forte concentration dans le lait cru des zones polluées présente un risque sanitaire réel, notamment pour les populations vulnérables comme les enfants et les femmes enceintes. Cela souligne la nécessité de renforcer la surveillance environnementale et les contrôles alimentaires dans les zones à risque.

2.3. Le Cuivre (Cu)

Les Résultats ANOVA montre une différence statistiquement significative entre les concentrations moyennes de cuivre dans le lait cru des deux zones ($F= 9,80$; $p\text{-value} < 0,01$) (figure 21). Cela signifie que la zone polluée présente des niveaux de cuivre significativement plus élevés, ce qui peut être attribué à une exposition environnementale.

Évaluation de la pollution par les métaux lourds dans le lait de vache produit dans différentes zones d'élevage de la région de Skikda



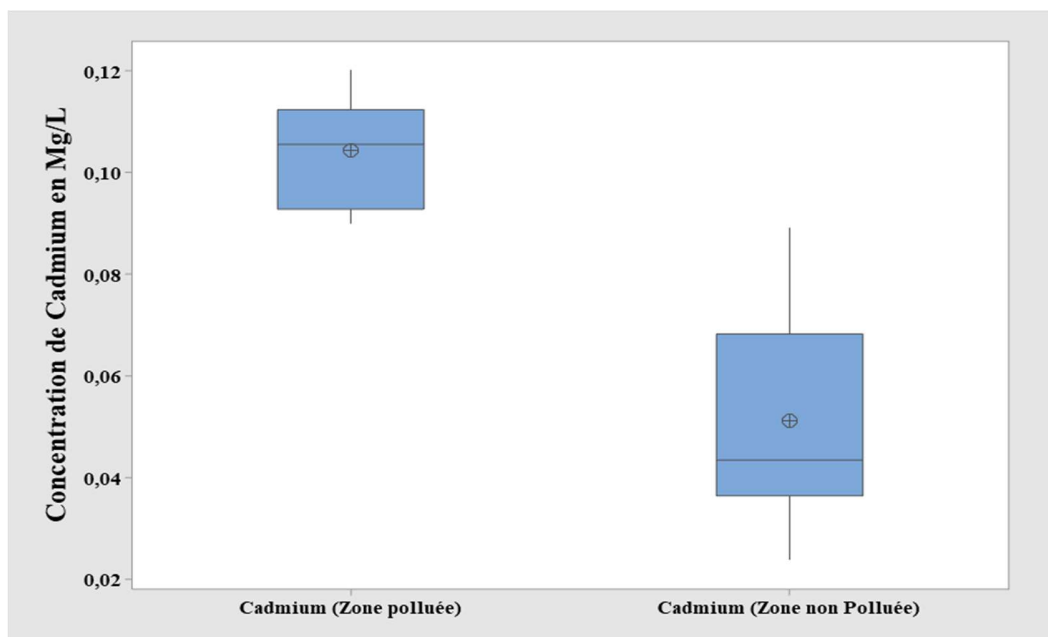
Figures 21 : Variation des concentrations du Cuivre en mg/L dans les deux zones échantillonnées.

Une étude de Benhassine et al. (2017) à El Tarf a révélé des taux de cuivre plus élevés dans le lait collecté près des zones industrielles, suggérant que la pollution environnementale influence clairement la contamination en cuivre du lait. De même, dans la région de Sétif, Benaissa et al. (2020) ont montré que le cuivre dans le lait pouvait provenir de l'eau de boisson contaminée, souvent à proximité de zones d'élevage intensif ou d'activités minières. En Tunisie, Brahim et al. (2015) ont constaté que le cuivre dans le lait était significativement plus élevé dans les zones agricoles intensives, en lien avec l'usage de pesticides et d'engrais riches en cuivre. En Turquie, Sekeroglu et al. (2012) ont rapporté des niveaux de cuivre supérieurs dans les produits laitiers des régions industrialisées, comparés aux zones rurales éloignées.

Les données recueillies dans la wilaya de Skikda montrent que le cuivre est significativement plus présent dans le lait cru des zones polluées, reflétant une contamination potentielle par des sources industrielles ou agricoles. Bien que le cuivre soit un oligo-élément essentiel, un excès peut être toxique et indique une altération de la qualité hygiénique de l'environnement d'élevage. Ces résultats soulignent l'importance d'une surveillance régulière des métaux lourds, même pour ceux considérés comme physiologiquement nécessaires, afin de garantir la sécurité des produits laitiers consommés localement.

2.4. Le Cadmium (Cd)

Les Résultats ANOVA montre une différence très hautement statistiquement significative entre les concentrations moyennes de Cadmium dans le lait cru des deux zones ($F = 40,29$; $p < 0,001$) (figure 22). Cela indique une différence claire et significative entre les niveaux de cadmium mesurés dans le lait cru entre les zones polluée et non polluée. Le cadmium est donc fortement influencé par les conditions environnementales, en particulier dans les zones sujettes à la pollution industrielle ou agricole.



Figures 22 : Variation des concentrations du Cadmium en mg/L dans les deux zones échantillonnées.

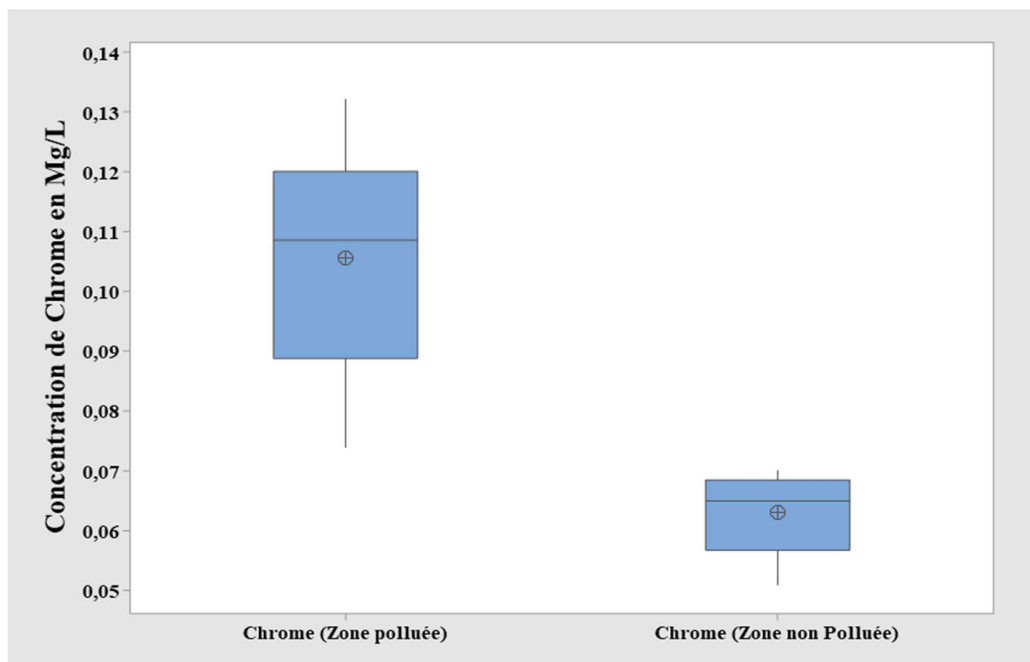
Bouzidi et al. (2018) ont signalé des concentrations préoccupantes de cadmium dans le lait cru à Annaba, notamment à proximité de complexes métallurgiques et d'activités industrielles. Leurs résultats indiquent que le cadmium peut facilement s'accumuler dans l'organisme des ruminants via l'eau, les aliments ou les sols contaminés. Une autre étude à Batna par Ghoulal et al. (2021) a démontré que les teneurs en Cd dans le lait dépassaient les recommandations de l'OMS dans certaines zones proches des stations d'épuration et de décharges industrielles. En Tunisie, Khelifi et al. (2013) ont montré que le cadmium est un contaminant fréquent dans les régions où les effluents industriels ne sont pas traités, ce qui affecte les produits d'origine

animale. En Inde, Patra et al. (2008) ont également mis en évidence des niveaux élevés de Cd dans le lait des animaux vivant près de zones industrielles, corrélant cette présence à des risques toxiques sérieux à long terme.

Le cadmium, métal lourd toxique et sans fonction biologique utile, est retrouvé en quantités significativement plus élevées dans le lait cru des fermes situées dans la zone polluée de Skikda. Ce constat, conforme aux études nationales et internationales, souligne l'urgence d'évaluer les sources de pollution, de renforcer les contrôles vétérinaires et de limiter l'exposition des animaux aux milieux contaminés, en particulier dans les zones industrielles.

2.5. Le Chrome (Cr)

Les Résultats ANOVA montrent qu'il existe une différence hautement significative entre les concentrations de chrome mesurées dans le lait cru des deux zones ($F = 31,69$; $P < 0,001$) (figure 23). Les niveaux plus élevés dans la zone polluée sont donc statistiquement confirmés, ce qui suggère une exposition à des sources environnementales de contamination.



Figures 23 : Variation des concentrations du Chrome en mg/L dans les deux zones échantillonnées.

À Constantine, Djebabra et al. (2019) ont détecté des traces de chrome dans le lait cru prélevé près d'activités industrielles, notamment de tanneries et ateliers mécaniques. Bien que les valeurs soient en deçà des normes toxiques, la contamination chronique pose un risque à long terme. Une étude de Bouguerra et al. (2022) dans l'est algérien a révélé des concentrations plus élevées de chrome dans les produits animaux issus de zones industrielles que dans celles des zones rurales, associées à la pollution des eaux et des sols. En Inde, Singh et al. (2013) ont montré que la proximité de zones industrielles, en particulier celles liées au traitement du cuir et des métaux, augmentait les niveaux de chrome dans les aliments d'origine animale. En Égypte, Abdel-Halim et al. (2018) ont signalé la présence de chrome dans le lait cru collecté dans des zones périurbaines, expliquant que la contamination pouvait venir des eaux d'abreuvement et de la bioaccumulation via les plantes fourragères.

Les résultats de Skikda démontrent une concentration significativement plus élevée en chrome dans le lait cru des zones polluées, ce qui s'accorde avec les observations scientifiques en Algérie et à l'étranger. Bien que le chrome soit un oligo-élément essentiel à très faibles doses, ses formes hexavalentes (Cr^{6+}) sont hautement toxiques et peuvent induire des effets cancérogènes. Il est donc crucial de mettre en place des mesures de contrôle environnemental, particulièrement dans les zones proches d'activités industrielles ou artisanales (métallurgie, tanneries, etc.), afin de préserver la sécurité sanitaire des aliments d'origine animale.

3. Évaluation des risques sanitaires liés à la consommation du lait issu des différentes zones d'élevage de la région de Skikda.

3.1. HammoudiHamrouch (zone polluée).

Le tableau 03 présente les analyses basées sur les échantillons de lait prélevés à HammoudiHamrouch (zone polluée), pour 5 indices environnementaux et sanitaires :

Évaluation de la pollution par les métaux lourds dans le lait de vache produit dans différentes zones d'élevage de la région de Skikda

Tableau 03 Les analyses des 5 indices environnementaux et sanitaires en zone polluée

	PI	EDI (mg/kg/j),	HRI	CF
Fer	8.421	0.0072	0.0103	8.4208
Plomb	21.43	0.0012	0.3062	21.4374
Cuivre	4.862	0.0013	0.0347	4.8624
Cadmium	104.375	0.0002	0.2982	104.375
Chrome	2.11	0.0003	0.1004	2.11
MLI	28.241			

3.1.1. Indice de pollution (PI).

Le PI mesure combien chaque métal dépasse la valeur limite recommandée : Tous les métaux dépassent leurs normes, en particulier le cadmium (>100 fois la limite) et le plomb (>21 fois). Cela indique une contamination grave du lait par ces métaux.

3.1.2. Indice de charge métallique (MLI)

C'est la moyenne des PI : MLI = 28,24: Cela reflète une forte charge globale en métaux lourds dans le lait de cette zone.

3.1.3. Dose journalière estimée (EDI)

Exprimée en mg/kg de poids corporel/jour (basée sur une consommation de 0,2 L/jour par un adulte de 70 kg). Les doses journalières estimées restent en dessous des limites critiques (voir HRI), ce qui ne pose pas de danger immédiat pour un adulte moyen. Cependant, pour des consommateurs fréquents ou vulnérables (enfants, femmes enceintes), le plomb et le cadmium approchent des seuils préoccupants, même à de faibles doses, en raison de leur effet cumulatif. L'EDI est un outil précoce d'alerte, car il permet d'identifier des risques avant que les effets sur la santé ne deviennent visibles. L'évaluation de l'EDI montre que les habitants consommant régulièrement du lait de cette zone peuvent être exposés de façon chronique à certains métaux lourds, en particulier le plomb (Pb) et le cadmium (Cd). Cela confirme la nécessité d'un contrôle de qualité rigoureux et d'actions de prévention auprès des populations locales.

3.1.4. Indice de risque sanitaire (HRI)

Si $HRI > 1$, il y a risque sanitaire : Les HRI sont < 1 mais proches de la limite pour le plomb et le cadmium, indiquant un risque potentiel pour les consommateurs réguliers.

3.1.5. Indice de contamination (CF). Similaire à PI, utilisé dans les analyses environnementales

Le lait prélevé à Hammoudi Hamrouch est très contaminé par certains métaux lourds. Le cadmium et le plomb posent un risque majeur, dépassant les seuils de sécurité fixés par le Codex Alimentarius ou l'OMS. Même si les indices HRI restent < 1 , leur proximité du seuil montre qu'une exposition chronique pourrait affecter la santé, notamment des enfants.

En Algérie, Bouzidi et al. (2018) à Annaba ont signalé des taux similaires de Cd et Pb dans le lait proche des zones industrielles. Khelil et al. (2016) à Blida ont trouvé des concentrations élevées de plomb ($> 0,3$ mg/L), comparables aux nos valeurs. En Égypte, Abou-Arab (1999) a documenté une contamination similaire du lait par Cd et Pb dans les zones urbaines. En Inde, Patra et al. (2008) ont aussi trouvé des niveaux élevés de métaux lourds dans le lait dans les régions industrielles.

3.2. Bin El Ouiden (zone non polluée).

Le tableau 04 présente les analyses basées sur les échantillons de lait prélevés à Bin El Ouiden (zone non polluée), pour 5 indices environnementaux et sanitaires :

Tableau 04 : Les analyses des 5 indices environnementaux et sanitaires en zone non polluée

	PI	EDI (mg/kg/j),	HRI	CF
Fer	8,02	0.00687	0.010	8.016
Plomb	7,06	0.00040	0.101	7.062
Cuivre	3,39	0.00097	0.024	3.387
Cadmium	51,13	0.00015	0.146	51.125
Chrome	1,26	0.00018	0.060	1.260
MLI	14,17			

3.2.1. Indice de pollution (PI)

Tous les métaux dépassent les normes de référence, notamment le cadmium (51 fois la limite) et le fer (8 fois), ce qui révèle une présence inattendue de contamination, même en zone supposée non polluée.

3.2.2. Indice de charge métallique (MLI ou LI)

Le score global indique une charge en métaux lourds modérée à élevée, même si elle reste inférieure à celle de la zone polluée.

3.2.3. Dose journalière estimée (EDI)

Toutes les valeurs d'EDI restent relativement basses, mais leur accumulation dans le temps peut représenter un risque sanitaire latent, surtout pour les populations sensibles.

3.2.4. Indice de risque sanitaire (HRI)

Les HRI sont tous < 1 , indiquant aucun risque sanitaire immédiat, mais des valeurs comme cadmium (0,15) et plomb (0,10) méritent une surveillance renforcée.

3.2.5. Indice de contamination (CF)

Identique à l'indice de pollution (PI) dans ce contexte : montre l'ampleur du dépassement par rapport aux normes.

Même en zone non polluée, la qualité du lait est compromise, notamment par : Une teneur élevée en cadmium, dépassant largement les normes et Des niveaux de plomb et fer également préoccupants. Cela peut s'expliquer par des sources indirectes de contamination : Aliments pour bétail (ensilage, eaux de puits) ou Dépôts atmosphériques ou engrais chimique

CONCLUSION

Cette étude a été conduite afin de mettre en évidence la problématique de la pollution environnementale dans les zones agricoles et d'élevage, en évaluant les niveaux d'accumulation des métaux lourds dans le lait cru produit dans la wilaya de Skikda, une région caractérisée par une forte juxtaposition entre activités agricoles et industrielles. Le choix du lait comme matrice d'étude se justifie par son importance nutritionnelle, en particulier pour les groupes vulnérables tels que les enfants et les femmes enceintes.

Les analyses menées sur cinq métaux lourds (fer, plomb, cuivre, cadmium et chrome) ont révélé que le lait provenant de la zone de Hammoudi Hamrouche, classée comme polluée, présentait des concentrations significativement plus élevées que celui de Bin El Ouiden, zone considérée comme non polluée. Des dépassements des seuils réglementaires ont été enregistrés, notamment pour le plomb et le cadmium, suggérant un risque potentiel pour la santé des consommateurs.

Les tests statistiques ont mis en évidence des différences significatives entre les deux zones, en particulier pour les métaux toxiques comme le plomb et le cadmium, soulignant l'impact des activités industrielles et des pratiques d'élevage non durables. Le fer, bien que présent en concentration élevée, n'a pas montré de variation significative, ce qui suggère une origine naturelle ou alimentaire.

Ces résultats confirment que la contamination par les métaux lourds constitue un enjeu réel, affectant la qualité des produits d'origine animale et représentant une menace pour la santé publique. Le lait cru apparaît ainsi comme un **bioindicateur pertinent** pour la surveillance de la pollution environnementale.

Au vu des résultats obtenus, les recommandations suivantes sont proposées :

- **Renforcer le contrôle sanitaire du lait cru**, notamment dans les zones proches des installations industrielles.
- **Mettre en place des programmes réguliers d'analyse** des fourrages, de l'eau et des sols dans les zones d'élevage.

- **Assurer des conditions d'élevage saines et durables**, limitant l'exposition des animaux aux contaminants environnementaux.
- **Utiliser le lait comme indicateur biologique** dans les dispositifs de surveillance de la pollution environnementale.
- **Sensibiliser les éleveurs et les consommateurs** aux risques liés à la présence de contaminants chimiques dans la chaîne alimentaire.

En somme, cette étude met en lumière l'urgence d'établir des politiques de contrôle plus rigoureuses et une meilleure coordination entre les secteurs de la santé, de l'environnement et de l'agriculture, en vue d'assurer une sécurité alimentaire durable et de protéger la santé du consommateur algérien.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2022; Järup et al., 1998)

Abdel-Halim, K. Y., El-Azab, M. F., & Ali, M. I. (2018). Heavy metal residues in raw milk from peri-urban areas in Egypt. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 53(5), 295–301.

Abidin, N. A. Z., Kassim, N. S. A. K., Izzadin, S. A., Ghazali, S. M., Pungot, N. H., & Kamni, S. S. (2021). Evaluation of Heavy Metals Concentration in Milk Products by Using Atomic Absorption Spectroscopy. *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*, 2(2), 136–141. <https://doi.org/10.20885/EKSAKTA.vol2.iss2.art7>

Abou-Arab, A. A. K. (1999). Effect of pollution on heavy metal content of cow's milk and human milk in Egypt. *Food Chemistry*, 68(4), 527–532.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2007). *Toxicological profile for arsenic*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2022). *Cadmium toxicity: Biological fate of cadmium in the body*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

Aiche, K., Messaoudi, D., & Fadel, A. E. (2015). *L'impact de la zone pétrochimique sur la ville de Skikda* (Mémoire de master, Université Constantine 3, Algérie).

Aithani, D., & Kushawaha, J. (2023). Heavy metals contamination in environment. Dans *Remediation of Heavy Metals: Sustainable Technologies and Recent Advances* (pp. 15–30). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119853589.ch2>

Al-Garory, N. H. S., & Al-Kaabi, W. J. (2020). Determination of some heavy metals concentration in some dairy products from three different regions of Basrah, Iraq. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 33(2), 1–13. <https://doi.org/10.37077/25200860.2020.33.2.01>

Ayar, A., Ekinçi, K., & Gönülol, N. (2009). Determination of heavy metals in honey produced in Hatay, Turkey. *Food Chemistry*, 112(2), 492–495. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.044>

Bakircioglu, D., Aydin, B., & Bakircioglu, Y. (2011). Determination of heavy metals in honey samples from different regions of Turkey. *Food Chemistry*, 128(2), 704–709.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.054>

Belhadj, M. Z., & Boudoukha, A. (2014). Dégradation des eaux de surface du barrage de Zit-Emba (wilaya de Skikda) par contamination en métaux lourds et pollution anthropique. *Journal Algérien des Régions Arides*, 14(2), 60–71.

Ben Aissa, H., Ziane, L., & Bouzid, S. (2020). Étude du transfert des métaux lourds vers le lait dans les zones minières de Sétif. *Journal Algérien de Biotechnologie*, 5(2), 77–83.

Benhassine, N., Djeddi, M., & Ouerdane, M. (2017). Contamination du lait cru par les métaux lourds dans la région d'El Tarf (Algérie). *Revue Algérienne des Sciences Agricoles*, 8(1), 55–62.

Bouguera, N., Mahjoubi, H., & Laouar, A. (2022). Contamination des produits laitiers par les métaux lourds dans l'est algérien. *Revue Nord Africaine de Biosciences*, 10(3), 210–218.

Boularbah, A., Schwartz, C., Bitton, G., Abouddrar, W., Ouhdouch, Y., & Morel, J. L. (2006). Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils. *Chemosphere*, 63(5), 802–810.

Bouzidi, A., Khelil, O., & Ghernaout, D. (2018). Évaluation de la pollution du lait cru par les métaux lourds dans la région industrielle d'Annaba (Algérie). *Revue des BioRessources*, 8(2), 77–85.

Bradl, H. B. (Éd.). (2005). *Heavy metals in the environment : Origin, interaction and remediation* (1^{re} édition). Amsterdam ; Boston : Elsevier Academic Press.

[https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(05\)80020-1](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(05)80020-1)

Brahim, R., Achour, A., & Amara, D. (2015). Pollution du lait cru par le cuivre dans les zones agricoles intensives en Tunisie. *Revue Maghrébine de Nutrition*, 4(3), 120–126.

Buldini, P. L., Cavalli, S., Mevoli, A., & Sharma, J. L. (2002). Ion chromatographic and voltammetric determination of heavy and transition metals in honey. *Food Chemistry*, 77(4), 487–495. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00222-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00222-3)

Claeys, H., Van Landeghem, S., Dubois, M., Maleux, K., & Inzé, D. (2014). What is stress? : Dose-response effects in commonly used in vitro stress assays. *Plant Physiology*, *165*(2), 519–527. <https://doi.org/10.1104/pp.113.234641>

Cyraniak, E., & Draszawka-Bolzan, B. (2014). Heavy metals in circulation biogeochemical [Heavy metals in circulation biogeochemical]. *World Scientific News*, *6*, 30–36

Davidova, S., Milushev, V. M., & Satchanska, G. (2024, 17 octobre). Molecular mechanisms of cadmium toxicity on living organisms [Prépublication]. *Preprints.org*. <https://doi.org/10.3390/toxics12120875>

Djebabra, M., Benslama, M., & Khelifa, R. (2019). Évaluation de la présence de métaux lourds dans le lait cru à proximité des zones industrielles à Constantine (Algérie). *Journal Algérien de Toxicologie*, *5*(2), 89–95.

Dobrzański, Z., Kolacz, R., Górecka, H., & Bartkowiak, A. (2005). The content of 38 microelements and trace elements in raw milk from cows in the Silesian region. *Polish Journal of Environmental Studies*, *14*(1), 93–102.

Gaetke, L. M., Chow-Johnson, H. S., & Chow, C. K. (2014). Copper: toxicological relevance and mechanisms. *Archives of Toxicology*, *88*(11), 1929–1938. <https://doi.org/10.1007/s00204-014-1355-y>

Ghougal, M., Ouerghi, A., & Ferhat, Z. (2021). Surveillance du cadmium dans le lait cru dans la région de Batna (Algérie). *Revue Maghrébine des Sciences de l'Environnement*, *6*(1), 42–49.

Hafsi, A., Abbas, K., Duyck, P.-F., & Chermiti, B. (2024). Traits de cycle de vie de *Dacus frontalis* Becker (Diptera : Tephritidae) élevés à quatre températures constantes. *Phytoparasitica*, *52*(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s12600-024-01132-y>

Hartwig, A. (2013). Arsenic interference with DNA repair and cell-cycle control: Molecular mechanisms of carcinogenicity. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, *31*(2), 121–134.

Hassan, A. A., & Jassim, H. M. (2010). Effect of treating lactating rats with lead acetate and its interaction with vitamin E or C on neuro-behaviour, development and some biochemical parameters in their pups. *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*, 24(1), 45–50.

Huang, L., Meng, X., & Zhao, J. (2021). Molecular mechanisms of arsenic-induced inhibition of DNA repair via zinc finger protein disruption. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 85, 103618.

Hussain, J., Rehman, N. U., Khan, A. L., Hamayun, M., Hussain, S. M., & Shinwari, Z. K. (2010). Proximate and nutrient evaluation of selected vegetable species from Kohat region Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 42(4), 2847–2855.

International Agency for Research on Cancer. (2012). *Arsenic, metals, fibres and dusts* (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100C). Lyon, France: World Health Organization, IARC.

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>

Johnson, L. E. (2025). Zinc toxicity. In *The Merck Manual of Diagnosis and Therapy* (Professional Version). Merck & Co., Inc. Retrieved from <https://www.merckmanuals.com/professional>

Jomova, K., & Valko, M. (2011). Advances in metal-induced oxidative stress and human disease. *Toxicology Letters*, 198(3), 162–169.

Kazim, M. M., & Kadhum, S. A. (2022). Evaluation of bioaccessibility of metals and health risk in agriculture soil in Al-Qadisiyah governorate, Iraq. *Ecology, Environment and Conservation*, 28(4), 2187–2195.

Khelil, O., Bouzidi, A., & Ghernaout, D. (2016). Évaluation de la contamination du lait cru par le plomb dans la région de Blida (Algérie). *Revue des Sciences de la Vie*, 8(2), 101–108.

Khelifi, R., Olfa, M., & Hamza-Chaffai, A. (2013). Cadmium contamination in food products from industrial areas in Tunisia. *Environmental Research*, 120, 33–38.

Kul, A., et al. (2023). Inhalational exposure to heavy metals and related health risk. *Science of the Total Environment*. Advance online publication.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173502>

Maftouh, A., El Fatni, O., Fayiah, M., Liew, R. K., Lam, S. S., & Bahaj, A. (2022). The application of water–energy nexus in the Middle East and North Africa (MENA) region: A structured review. *Applied Water Science*, 12, Article 83. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01613-7>

MedECC. (2020). *Climate and environmental change in the Mediterranean Basin: Current situation and risks for the future. First Mediterranean assessment report* [Cramer, W., Guiot, J. & Marini, K. (Éds.)]. Marseille, France : Union for the Mediterranean, Plan Bleu, PNUE/PAM – Convention de Barcelone. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4768833>

Møller, L. B., & Aaseth, J. (2022). Copper. Dans G. F. Nordberg & M. Costa (Éds.), *Handbook on the toxicology of metals* (5^eéd., vol. 2, pp. 243–266). London, Royaume-Uni : Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822946-0.00009-X>

National Research Council (US) Committee on Medical and Biological Effects of Environmental Pollutants. (1977). *Arsenic: Medical and biologic effects of environmental pollutants*. National Academies Press.

Park, Y. W., & Haenlein, G. F. W. (2013). *Milk and dairy products in human nutrition: Production, composition and health*. Oxford, Royaume-Uni : Wiley-Blackwell.

Patel, C., Shuai, C., & Zhang, Y. (2022). Occurrence of uranium, thorium and rare earth elements in the environment: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1058053. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058053>

Patočka, J., & Kuča, K. (2016). Contamination, toxicity and speciation of heavy metals in an industrialized urban river: Implications for the dispersal of heavy metals. *Mendelian Manuscript Studies & Letters* (MMSL), 85(4).

Patra, R. C., Swarup, D., Naresh, R., Kumar, P., & Shekhar, P. (2008). Milk trace elements in lactating cows reared around the industrial area of India: Safety assessment. *Science of the Total Environment*, 404(1), 36–43.

Qin, Y., Chen, W., Wei, C., & Cai, Z. (2009). Heavy metals and arsenic speciation in atmospheric fine particles in Beijing, China. *Environmental Science & Technology*, 43(14), 5257–5262. <https://doi.org/10.1021/es900701r>

Ray, S., & Vashishth, R. (2024). From water to plate: Reviewing the bioaccumulation of heavy metals in fish and unraveling human health risks in the food chain. *Emerging Contaminants*, 10(4), 100358.

Saleh, S., Ali, E. A., Elleboudy, A., & Amer, A. (2019). Heavy metals in raw milk and some dairy products at local markets. *Damanhour Journal of Veterinary Sciences*, 1(1), 27–30. <https://doi.org/10.5455/DJVS.27082>

Scott, G. R., & Sloman, K. A. (2004). The effects of environmental pollutants on complex fish behavior: Integrating behavioral and physiological indicators of toxicity. *Aquatic Toxicology*, 68(4), 369–392. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2004.03.016>

Sekeroglu, A., Aksu, H., & Kara, M. (2012). Heavy metal residues in milk and dairy products from industrial and rural areas in Turkey. *Food Additives & Contaminants*, 29(2), 154–160.

Shankar, A. H., & Prasad, A. S. (1998). Zinc and immune function: The biological basis of altered resistance to infection. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 68(2 Suppl), 447S–463S.

Singh, A., Kumar, P., & Yadav, S. (2013). Chromium contamination in dairy products near industrial sites. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(9), 7401–7409.

Stoytcheva, M., & Zlatev, R. (Éds.). (2018, 25 juillet). *Arsenic : Analytical and toxicological studies*. Londres, Royaume-Uni : IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72058>

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In A. Luch (Éd.), *Molecular, clinical and environmental toxicology*

(*Experientia Supplementum*, vol. 101, pp. 133–164). Bâle : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Bioaccumulation testing and interpretation for the purpose of sediment quality assessment: Status and needs* (EPA Report No. 823-R-00-001). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water and Office of Solid Waste.

U.S. Environmental Protection Agency. (2023, 21 décembre). *Inventory of mercury supply, use, and trade in the United States 2023 report*. EPA. Repéré le 25 juin 2025, de <https://www.epa.gov/chemicals-under-tsca/epa-publishes-2023-mercury-inventory-report>

U.S. Environmental Protection Agency. (2023, juin 10). What is Acid Rain? In EPA.gov. Repéré le 10 juin 2025, de <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>

Velayo, C. L., Reforma, K. N., Sicam, R. V. G., Diwa, M. H., Sy, A. D. R., & Tantengco, O. A. G. (2022). Clinical performance of a multivariate index assay in detecting early-stage ovarian cancer in Filipino women. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 9896. <https://doi.org/10.3390/ijerph19169896>

Vengosh, A., Coyte, R. M., Podgorski, J., & Johnson, T. M. (2022). A critical review on the occurrence and distribution of the uranium- and thorium-decay nuclides and their effect on the quality of groundwater. *Science of the Total Environment*, 808, 151914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151914>

Walsh, A. (1955). The application of atomic absorption spectra to chemical analysis. *Spectrochimica Acta*, 7, 108. [https://doi.org/10.1016/0371-1951\(55\)80013-6](https://doi.org/10.1016/0371-1951(55)80013-6)

Walzer, K. A., Tandel, J., Byerly, J. H., Daniels, A. M., Gullicksrud, J. A., Whelan, E. C., Carro, S. D., Krespan, E., Beiting, D. P., & Striepen, B. (2024). Transcriptional control of the *Cryptosporidium* life cycle. *Nature*, 630(8015), 174–180. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07466-1>

Évaluation de la pollution par les métaux lourds dans le lait de vache produit dans différentes zones d'élevage de la région de Skikda

Yahaya, S., Ahmad, N., & Abdalla, R. F. (2010). Multicriteria analysis for flood vulnerable areas in Hadejia–Jama'are River Basin, Nigeria. *European Journal of Scientific Research*, 42(1), 71–83.