

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS SÉTIF 1

FACULTÉ DE MÉDECINE



Université Ferhat Abbas Sétif 1

DÉPARTEMENT DE PHARMACIE

---

**Évaluation des taux de métaux toxiques (Plomb, Cadmium,  
Nickel) dans le lait de chamelle cru au niveau du Sahara  
septentrional algérien (Biskra, El-Oued, Ouargla, Ghardaïa)**

---

**THESE**

**POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
DOCTORAT EN SCIENCES MEDICALES**

**Spécialité : Toxicologie**

**Présentée par Mohamed Amine KERDOUN**

**Maitre-assistant Hospitalo-universitaire en Toxicologie**

**Soutenue publiquement le 13/02/2024**

**Directeur de thèse : Professeur Rachid DJAFER**

**Jury d'évaluation :**

<b>Professeure REZK-KALLAH Haciba</b>	<b>Présidente</b>	<b>Université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella</b>
<b>Professeur DJAFER Rachid</b>	<b>Directeur de thèse</b>	<b>Université BADJI Mokhtar Annaba</b>
<b>Professeur CHEHMA Abdelmadjid</b>	<b>Membre</b>	<b>Université KASDI Merbah Ouargla</b>
<b>Professeure BENBOUDIAF Sabah</b>	<b>Membre</b>	<b>Université FERHAT Abbas Sétif 1</b>
<b>Professeur ZEBBICHE Younes</b>	<b>Membre</b>	<b>Université BENYOUCEF Benkhedda Alger 1</b>

**Année universitaire 2023-2024**



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS SÉTIF 1

FACULTÉ DE MÉDECINE



Université Ferhat Abbas Sétif 1

DÉPARTEMENT DE PHARMACIE

---

**Évaluation des taux de métaux toxiques (Plomb, Cadmium,  
Nickel) dans le lait de chamelle cru au niveau du Sahara  
septentrional algérien (Biskra, El-Oued, Ouargla, Ghardaïa)**

---

**THESE**

**POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
DOCTORAT EN SCIENCES MEDICALES**

**Spécialité : Toxicologie**

**Présentée par Mohamed Amine KERDOUN**

**Maitre-assistant Hospitalo-universitaire en Toxicologie**

**Soutenue publiquement le 13/02/2024**

**Directeur de thèse : Professeur Rachid DJAFER**

**Jury d'évaluation :**

<b>Professeure REZK-KALLAH Haciba</b>	<b>Présidente</b>	<b>Université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella</b>
<b>Professeur DJAFER Rachid</b>	<b>Directeur de thèse</b>	<b>Université BADJI Mokhtar Annaba</b>
<b>Professeur CHEHMA Abdelmadjid</b>	<b>Membre</b>	<b>Université KASDI Merbah Ouargla</b>
<b>Professeure BENBOUDIAF Sabah</b>	<b>Membre</b>	<b>Université FERHAT Abbas Sétif 1</b>
<b>Professeur ZEBBICHE Younes</b>	<b>Membre</b>	<b>Université BENYOUCEF Benkhedda Alger 1</b>

**Année universitaire 2023-2024**

بِسْمِ اللَّهِ تَوَكَّلْتُ عَلَى اللَّهِ

## REMERCIEMENTS

**À mon directeur de thèse le professeur DJAFER Rachid,**

*« Le meilleur professeur est celui qui te dit où regarder sans te dire ce que tu dois voir ».*

Je vous suis plus que reconnaissant pour la confiance que vous m'avez accordée en acceptant d'encadrer ce modeste travail. Par votre confiance, patience et soutien, par votre orientation et tous les conseils que vous avez prodigués, par votre présence continuelle, j'ai pu approfondir mes connaissances et développer mes compétences de recherche.

En tant qu'un de vos anciens élèves, je mesure la chance que j'ai eu de vous avoir comme maître et mentor. Je souhaite par la même occasion rendre hommage à votre haute qualité humaine et sociale « ce n'est pas d'un livre qu'on apprend les plus grandes leçons, mais plutôt d'un homme comme vous ».

# REMERCIEMENTS

**À madame la professeure REZK-KALLAH Haciba,**

Je tiens à vous exprimer mes sincères remerciements pour l'immense honneur que vous m'avez fait en acceptant de présider le jury de ma thèse. C'est pour moi un véritable privilège de bénéficier de votre expertise et de votre expérience acquise tout au long de votre carrière remarquable. Votre présidence a véritablement apporté une grande valeur ajoutée et vos commentaires et suggestions ont été d'une grande aide pour mon modeste travail. Merci encore professeure.

## REMERCIEMENTS

**À monsieur le professeur CHEHMA Abdelmadjid,**

Je tenais à vous exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements pour votre contribution en tant que membre de mon jury de thèse. Votre disponibilité et le temps que vous avez consacré à lire et à corriger mon manuscrit ont été d'une aide précieuse pour moi.

Je tiens également à rendre hommage à votre personne. En tant que doyen, vous avez toujours été accessible et attentif aux besoins des étudiants. Votre porte ouverte, votre volonté de prendre le temps de nous écouter et votre souci de notre bien-être ont fait de vous un modèle de bienveillance et de compréhension.

## REMERCIEMENTS

### **À madame la professeure BENBOUDIAF Sabah,**

Je tiens à vous exprimer ma sincère gratitude pour avoir accepté de faire partie de mon jury. Je suis reconnaissant pour la générosité que vous avez fait preuve en consacrant du temps pour lire et corriger mon manuscrit. Vos remarques constructives et votre regard critique ont été d'une grande aide pour moi, et ont permis d'enrichir considérablement mon travail.

En tant qu'ancien membre de votre équipe à Sétif, j'estime être honoré de vous voir comme membre de jury lors de ma soutenance. Durant mon passage dans votre service, je reste marqué par votre passion pour la recherche qui m'a permis de développer mes compétences et ma curiosité intellectuelle et a ouvert pour moi les portes d'une carrière universitaire. Je vous suis profondément reconnaissant pour tout ce que vous avez fait pour moi.



## REMERCIEMENTS

**À monsieur le professeur ZEBBICHE Younes,**

Je tiens à vous exprimer mes sincères remerciements pour avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation de mon travail. Votre temps et votre expertise ont été d'une importance capitale pour moi, et je suis reconnaissant de l'opportunité qui m'a été offerte de bénéficier de vos précieuses remarques. Grâce à votre participation, j'ai pu améliorer significativement mon travail. Vos commentaires constructifs et vos suggestions ont été d'une grande aide pour moi, et m'ont permis de comprendre mes forces et mes faiblesses, tout en me donnant une nouvelle perspective sur mon travail.

## REMERCIEMENTS

Ce manuscrit est l'aboutissement d'un travail qui n'aurait jamais pu voir le jour sans l'aide de nombreuses personnes. Je veux ainsi exprimer mes vifs remerciements à toute l'équipe du Plateau Technique du centre de recherche en analyses physico-chimiques de Ouargla, qui sans eux, ce travail n'aurait jamais pu aboutir.

Un grand merci au Pr. Benkhelfa Hakim, directeur du plateau technique, à madame Halima Dali, madame Sara Moufouk, Monsieur Youcef Rahmani, Walid Bousbaa et Ilyes Kelai.

Merci encore une fois.

Je tiens également à remercier le Dr. Tarek Harizi pour la réalisation de la cartographie des élevages de la région.

J'adresse mes remerciements sincères à tout le personnel de l'annexe du Centre National de Toxicologie de Ouargla et mes collègues de la faculté de médecine de l'université Kasdi Merbah de Ouargla.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ma thèse. Que ce soit par des discussions inspirantes, des conseils avisés, des encouragements ou une aide technique.

## DEDICACES

À ma mère Naziha, aucun mot ne saurait décrire mon amour et mon affection pour toi mama. Tu es le soleil qui illumine mes nuits et mon pilier dans la vie. Merci d'avoir fait de moi ce que je suis. Je suis fier d'être ton fils.

À mon père Foudil, tu es un Homme avec un grand H et un exemple éternel pour moi. Plus qu'un père, tu es également un véritable mentor. Merci d'être toujours là pour moi. Ton fils Amine.

À ma femme Magda Rania, tu le sais déjà mais je le répète : « tu es ma complice, mon âme sœur et je ne peux qu'être reconnaissant de t'avoir dans ma vie ». Merci pour tout ce que tu as fait et tout ce que tu feras. Que dieu te garde ma chère épouse.

À mes petites sœurs Rym et Malek, merci pour tout le soutien et le réconfort que vous m'avez toujours donné. J'espère être la toujours pour vous et vous voir réussir dans vos vies. Votre grand frère qui vous aime. Que dieu vous garde.

À mon oncle, le professeur Azzouz Kerdoun. Je te dédis particulièrement ce modeste travail. Je suis sûr que tu aurais été tellement fier de ce jour, toi qui m'as toujours motivé et fait de la recherche scientifique une priorité dans ta vie. Repose en paix cher ami.

À mes neveux Mélina et Youcef, merci pour la joie et le bonheur que vous me donnez à chaque fois que je vous vois. Votre oncle qui vous aime et vous aimera toujours.

À Mohamed et ma Tante Salima, merci de faire partie de ma famille. Vous êtes des personnes très chères à mon cœur.

À ma chère Tata Nadia, je ne t'ai jamais oublié et tu resteras toujours dans mon cœur. Chaque jour, je prie pour toi. Repose en paix.

À mes grands-parents (Salah, Saad, Zbida, Messaouda), j'aurais aimé mieux vous connaître. Je suis sûr que vous auriez été fier de moi. Reposez en paix.

À ma belle-famille Merazka (Maya, Nadine, Abdenour et Chakib), merci pour votre réconfort et votre présence. Je suis très heureux de faire partie de votre famille.

À mes enseignants, depuis mon enfance, jusqu'à aujourd'hui, sachez que vous avez été la lumière qui m'a guidé là où je suis aujourd'hui. En dédiant cette thèse à vous, je veux vous honorer et rendre hommage à votre vie, à votre héritage et à tout ce que vous avez représenté pour moi.

À mes collègues, à mes amis, à mon équipe de Ouargla, à toute personne qui a été là pour moi un jour ou l'autre, à toute personne qui a fait de moi l'homme que je suis et que je serai, merci infiniment.



# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	iv
DEDICACES .....	x
TABLE DES MATIERES .....	xi
LISTE DES ABREVIATIONS .....	xviii
LISTE DES FIGURES.....	xx
LISTE DES TABLEAUX.....	xxii
LISTE DES EQUATIONS.....	xxvi
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>6</b>
<b>CHAPITRE I LE LAIT DE CHAMELLE .....</b>	<b>7</b>
I.1. Généralités sur le dromadaire .....	7
I.1.1. Taxonomie.....	7
I.1.2. Répartition géographique des dromadaires .....	8
A. Distribution mondiale des dromadaires .....	8
B. Distribution des dromadaires en Algérie.....	9
C. Production et consommation du lait de chamelle .....	10
I.2. Caractéristiques du lait de chamelle .....	11
I.2.1. Caractéristiques physico-chimiques du lait de chamelle.....	11
I.2.2. Composition chimique du lait de chamelle .....	12
A. Teneur en eau .....	12
B. Teneur en matière grasse.....	12
C. Teneur en protéines .....	13
D. Teneur en minéraux.....	14
E. Teneur en vitamines .....	14
F. Teneur en lactose .....	15
I.3. Potentiels thérapeutiques du lait de chamelle .....	15
I.3.1. Rôle dans le diabète.....	15
I.3.2. Rôle contre l'intolérance au lactose et les allergies .....	16
I.3.3. Rôle dans le cancer.....	17
I.3.4. Effet antidiarrhéique.....	17
I.3.5. Rôle contre les infections .....	17
I.3.6. Rôle contre l'autisme .....	18



I.3.7. Autres effets potentiels.....	18
<b>CHAPITRE II CONTAMINANTS DU LAIT ET PROFILS TOXICOLOGIQUES DES METAUX LOURDS .....</b>	<b>19</b>
II.1. Contaminants du lait.....	20
II.1.1. Contaminants microbiens.....	20
II.1.2. Contaminants chimiques.....	21
A. Pesticides.....	21
B. Antibiotiques.....	21
C. Mycotoxines.....	21
D. Métaux lourds.....	21
II.2. Définition d'un métal lourd.....	22
II.3. Profil toxicologique du Plomb.....	23
II.4. Profil toxicologique du Cadmium.....	25
II.5. Profil toxicologique du Mercure.....	26
II.6. Profil toxicologique du Nickel.....	27
<b>CHAPITRE III TRANSFERT DES METAUX LOURDS VERS LE LAIT .....</b>	<b>29</b>
III.1. Rôle des matrices environnementales dans la contamination du lait.....	30
III.2. Mécanisme de transport lactationnel des métaux lourds.....	32
III.3. Facteurs influant sur la teneur en métaux du lait.....	34
III.3.1. Métabolisme animal.....	34
III.3.2. Niveau d'exposition.....	34
III.3.3. Durée de l'exposition.....	34
III.3.4. Phase de lactation.....	34
III.3.5. Gestion alimentaire.....	35
III.4. Transfert, accumulation et excrétion des métaux toxiques après ingestion alimentaire dans l'organisme animal.....	35
<b>CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE .....</b>	<b>36</b>
IV.1. Matériel et méthodes.....	38
IV.1.1. Recherche de la littérature.....	38
IV.1.2. Critères de sélection, d'inclusion et d'exclusion.....	39
IV.1.3. Extraction des données.....	39
IV.1.4. Évaluation probabiliste des risques pour la santé.....	41
A. Estimation de l'apport quotidien.....	41

B. Estimation du quotient de risque non cancérigène.....	41
C. Estimation du Risque Cancérigène .....	42
IV.2. Résultats de la revue systématique .....	42
IV.2.1. Caractéristiques de l'étude .....	42
IV.2.2. Concentration des métaux dans le lait de chamelle.....	45
A. Plomb dans le lait de chamelle.....	45
B. Cadmium dans le lait de chamelle.....	46
C. Nickel dans le lait de chamelle.....	47
D. Mercure dans le lait de chamelle.....	47
E. Quotient de danger .....	47
F. Calcul du risque cancérigène .....	50
IV.3. Discussion.....	51
IV.3.1. Présence des métaux toxiques dans le lait.....	51
IV.3.2. Evaluation du risque non cancérigène.....	52
IV.3.3. Evaluation du risque cancérigène du Plomb et du Cadmium.....	53
<b>CHAPITRE V REGLEMENTATION CONCERNANT LA TENEUR DES METAUX</b>	
<b>DANS LE LAIT.....</b>	<b>55</b>
V.1. Organismes de réglementation internationaux .....	56
V.2. Limites Maximales de résidus .....	56
<b>PARTIE PRATIQUE.....</b>	<b>58</b>
<b>OBJECTIFS.....</b>	<b>60</b>
1. Objectif principal .....	60
2. Objectifs secondaires .....	60
<b>CHAPITRE I MATERIEL ET METHODES.....</b>	<b>61</b>
I.1. Méthodes .....	62
I.1.1. Type d'étude.....	62
I.1.2. Présentation de l'étude .....	62
A. Population animale étudiée .....	62
B. Zone d'étude.....	63
C. Période de l'étude.....	66
I.1.3. Critères d'inclusion et de non inclusion .....	66
A. Critères d'inclusion .....	66
B. Critères de non inclusion.....	66
I.1.4. Analyse environnementale et spatiale des élevages de l'étude .....	66

A. Principe de l'analyse .....	66
B. Récolte des données .....	67
C. Indicateurs de risques de pollution.....	67
I.1.5. Paramètres à étudier et critères de choix des métaux à analyser.....	68
I.1.6. Collecte des échantillons .....	69
A. Echantillonnage du sol .....	69
B. Echantillonnage de l'eau d'abreuvement.....	69
C. Echantillonnage des plantes .....	70
D. Echantillonnage du lait.....	72
E. Transport des échantillons .....	72
I.1.7. Préparation et prétraitement des échantillons pour le dosage des métaux .....	73
A. Préparation et minéralisation des échantillons de sol .....	73
B. Préparation et minéralisation des échantillons de plantes .....	74
C. Préparation et minéralisation des échantillons de lait de chamelle .....	75
I.1.8. Dosage des éléments traces métalliques (Plomb, Cadmium, Nickel).....	76
A. Conditions analytiques.....	77
B. Procédure de validation analytique .....	79
C. Contrôle qualité .....	83
I.1.9. Dosage du Mercure dans l'eau d'abreuvement et le lait .....	84
I.1.10. Paramètres physico-chimiques de l'eau d'abreuvement et du lait .....	86
A. Analyses physico-chimiques de l'eau d'abreuvement .....	86
B. Analyses physico-chimiques du lait.....	86
I.1.11. Analyse de la contamination métallique et de ses implications .....	87
A. Calcul de l'index de géoaccumulation du sol .....	87
B. Calcul du facteur de transfert des métaux entre les matrices .....	88
C. Calcul du risque sanitaire .....	88
I.1.12. Analyses statistiques .....	90
I.1.13. Considération éthique.....	91
I.2. Matériel.....	92
I.2.1. Réactifs chimiques .....	92
I.2.2. Appareillage .....	92
<b>CHAPITRE II RESULTATS.....</b>	<b>94</b>
II.1. Validation analytique des méthodes de dosage des métaux.....	95
II.1.1. Validation analytique du dosage du Plomb .....	95
A. Validation du dosage du Plomb dans le sol .....	95

B. Validation du dosage du Plomb dans l'eau .....	98
C. Validation du dosage du Plomb dans les plantes .....	100
D. Validation du dosage du Plomb dans le lait .....	103
II.1.2. Validation analytique du dosage du Cadmium .....	106
A. Validation du dosage du Cadmium dans le sol .....	106
B. Validation du dosage du Cadmium dans l'eau .....	109
C. Validation du dosage du Cadmium dans les plantes .....	112
D. Validation du dosage du Cadmium dans le lait.....	114
II.1.3. Validation analytique du dosage du Nickel .....	117
A. Validation du dosage du Nickel dans le sol .....	117
B. Validation du dosage du Nickel dans l'eau .....	120
C. Validation du dosage du Nickel dans le lait .....	123
II.1.4. Résumé des domaines de linéarité et des limites de détection et de quantification pour les méthodes validées .....	125
II.1.5. Résultats des contrôles de qualités effectuées .....	125
II.2. Analyse environnementale et spatiale des élevages de l'étude .....	126
II.3. Concentrations des métaux au niveau des différentes matrices .....	127
II.3.1. Etude du sol.....	127
A. Concentration des éléments traces métalliques dans le sol.....	127
B. Variations saisonnières de la concentration en éléments traces métalliques.....	128
C. Variation spatiale des concentrations des métaux dans le sol .....	129
D. Analyse statistique multivariée .....	129
E. Indice de geoaccumulation des métaux .....	130
II.3.2. Etude de l'eau d'abreuvement .....	131
A. Paramètres physico-chimiques de l'eau d'abreuvement .....	131
B. Concentration en éléments traces métalliques dans l'eau d'abreuvement .....	131
C. Variation saisonnière de la concentration en éléments traces dans l'eau d'abreuvement .....	132
C. Variation spatiale des concentrations en métaux dans les échantillons d'eau d'abreuvement.....	132
D. Analyse statistique multivariée .....	133
II.3.3. Etude des plantes.....	134
A. Concentration des éléments traces métalliques.....	134
B. Variations saisonnières de la concentration en éléments traces métalliques.....	134
C. Variation spatiale des concentrations de métaux dans les plantes .....	135



D. Analyse statistique de corrélation .....	135
II.3.4. Etude du lait .....	136
A. Propriétés physico-chimiques du lait de chamelle .....	136
B. Concentration des éléments traces métalliques .....	136
C. Répartition spatiale de la teneur des métaux selon le site de l'élevage.....	136
D. Variation saisonnière des concentrations en éléments traces métalliques .....	138
E. Variation spatiale des concentrations en métaux des échantillons de lait .....	138
F. Analyse statistique multivariée.....	139
II.4. Corrélation entre les différentes matrices (sol, eau d'abreuvement, plantes et lait) ...	140
II.4.1. Interaction du Plomb.....	140
A. Analyse de corrélation.....	140
B. Analyses en composantes principales du Plomb .....	140
II.4.2. Interaction du Cadmium .....	141
A. Analyse de corrélation.....	141
B. Analyses en composantes principales du Cadmium .....	142
II.4.3. Interaction du Nickel.....	142
A. Analyse de corrélation.....	142
B. Analyses en composantes principales du Nickel.....	143
II.5. Analyse de la contamination métallique et de ses implications .....	143
II.5.1. Évaluation des facteurs de transfert entre les différentes matrices .....	143
II.5.2. Évaluation probabiliste des risques pour la santé .....	144
A. Estimation de la consommation quotidienne des métaux ingérés .....	144
B. Estimation du risque non cancérigène et de l'indice de danger .....	145
D. Estimation du risque cancérigène pour le Plomb et le Cadmium .....	146
<b>CHAPITRE III DISCUSSION.....</b>	<b>148</b>
III.1. Validation analytique des méthodes de dosage des métaux.....	149
III.2. Analyse environnementale et spatiale des élevages de l'étude .....	151
III.3. Concentrations des métaux au niveau des différentes matrices .....	152
III.3.1. Contamination métallique du sol.....	152
A. Concentration du Plomb dans le sol.....	152
B. Concentration du Cadmium dans le sol.....	155
C. Concentration du Nickel dans le sol.....	155
D. Corrélation entre les métaux dans le sol .....	156
E. Indice de geoaccumulation et facteur de variabilité des métaux dans le sol .....	156

III.3.2. Contamination métallique de l'eau d'abreuvement.....	159
A. Paramètres de potabilité de l'eau d'abreuvement .....	159
B. Concentration du Plomb dans l'eau d'abreuvement .....	159
C. Concentration du Cadmium dans l'eau d'abreuvement .....	160
D. Concentration du Nickel dans l'eau d'abreuvement .....	161
E. Concentration du Mercure dans l'eau d'abreuvement.....	161
F. Corrélation entre les métaux dans l'eau d'abreuvement.....	162
III.3.3. Contamination métallique des plantes .....	162
A. Concentration du Plomb dans les plantes.....	162
B. Concentration du Cadmium dans les plantes .....	163
C. Facteurs de variabilité de la concentration des métaux dans les plantes.....	164
D. Corrélation entre les métaux dans les plantes .....	166
III.3.4. Contamination métallique du lait de chamelle .....	167
A. Concentration du Plomb dans le lait de chamelle .....	167
B. Concentration du Cadmium dans le lait de chamelle.....	171
C. Concentration du Nickel dans le lait de chamelle .....	173
D. Concentration du Mercure dans le lait de chamelle .....	174
E. Corrélation entre les métaux dans le lait de chamelle .....	175
III.4. Analyse de la contamination métallique et de ses implications .....	175
III.4.1. Facteur de transfert du Plomb et du Cadmium (sol-plantes et plantes-lait) .....	175
III.4.2. Corrélation entre les concentrations dans lait et les matrices environnementales..	176
III.4.3. Évaluation probabiliste des risques pour la santé.....	178
A. Estimation de la consommation quotidienne des métaux ingérés.....	178
B. Estimation du risque non cancérogène et de l'indice de danger .....	179
C. Estimation du risque cancérogène pour le Plomb et le Cadmium .....	181
III.5. Limites de l'étude.....	182
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>184</b>
Références bibliographiques .....	189
Annexes.....	223

## LISTE DES ABREVIATIONS

%RSD : pourcentage de l'écart-type relatif

ACP : Analyse en Composantes Principales

ADN : Acide désoxyribonucléique

ANOVA : Analyse de la variance à un facteur

ATSDR: Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry

BW : Body Weight

Cd : Cadmium

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

CRAPC : Centre de Recherche en Analyses Physico-Chimiques.

CVAAS : Spectroscopie d'absorption atomique de vapeur d'hydrure

DHTP : Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire

DJTP : Dose Journalière Tolérable Provisoire

EDI: Estimated Daily Intake

EFSA : Autorité européenne de sécurité des aliments

FAO : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

GPS: Global Positioning System.

HI : *Hazard index*

Hg : Mercure

HQ : Hazard Quotient

IR : Intake Rate

ICP-AES: Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

ICP-MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

ICP-OES: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer

JECFA : Joint Comité d'experts FAO/OMS sur les additifs alimentaires

LD : Limite de détection

LMR : Limite Maximale de Résidus

LQ : Limite de quantification

MRC : matériaux de référence certifiés

Ni : Nickel

NTU : Unités de turbidité néphélométrique

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONM : Office National de Météorologie

PRISMA : Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis

Pb : Plomb

PET : polyéthylène téréphtalate

RC : Risque cancérigène

RCT : Risque cancérigène total

RfD : Dose de référence

SAA : Spectroscopie d'absorption atomique

SAA-FG : Spectrométrie d'absorption atomique-four à graphite

UHT : Ultra Haute Température

US-EPA : United States-Environmental Protection Agency

VEGF : Facteur de croissance endothélial vasculaire

µg : microgramme

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les deux espèces principales de <i>Camélidae</i> (a) : <i>Camelus bacterianus</i> , (b) : <i>Camelus dromedarius</i> [12].	8
Figure 2. Répartition mondiale des dromadaires [13].	8
Figure 3. Consommation moyenne annuelle par habitant de lait de chamelle [30].	10
Figure 4. Toxicocinétique du Plomb [117].	24
Figure 5. Mécanismes de transfert des métaux lourds dans la chaîne alimentaire [141].	30
Figure 6. Résumé du transfert, de l'accumulation et de l'excrétion des métaux toxiques après ingestion alimentaire, adapté et modifié de Zhou et al, (2019) [141].	35
Figure 7. Organigramme du processus de sélection des études, conformément aux lignes directrices PRISMA.	40
Figure 8. Carte de localisation des études sur le lait cru de chamelle dans différents pays du monde pour mesurer les niveaux de métaux lourds entre 2000 et 2023.	43
Figure 9. Localisation des dix élevages sélectionnés dans l'étude.	65
Figure 10. Exemple d'une source d'eau d'abreuvement pour les animaux.	70
Figure 11. Traite d'une chamelle par un jeune enfant.	72
Figure 12. Godets en téflon utilisés pour la minéralisation de la matière organique.	73
Figure 13. Four à micro-ondes de la marque Analytik-Jena®.	74
Figure 14. Dilution des échantillons de lait minéralisés.	76
Figure 15. Spectrophotomètre d'absorption atomique ContrAA 800.	77
Figure 16. Logigramme permettant de sélectionner un protocole de validation [249-252].	80
Figure 17. Automate Mercurr® pour le dosage du Mercure dans le lait.	84
Figure 18. Courbe de calibration du Mercure pour le dosage de l'eau d'abreuvement.	85
Figure 19. Profil d'exactitude du profil de validation du dosage du Plomb dans le sol.	97
Figure 20. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans l'eau.	99
Figure 21. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du plomb dans les plantes.	102
Figure 22. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans le lait.	105
Figure 23. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du cadmium dans le sol.	107
Figure 24. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du cadmium dans l'eau.	111
Figure 25. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans les plantes.	113
Figure 26. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans le lait.	115
Figure 27. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans le sol.	119

Figure 28. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans l'eau. ....	122
Figure 29. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans le lait. ....	124
Figure 30. Degrés de pollution des élevages selon l'analyse spatiale.....	126
Figure 31. ACP avec représentations de rotation pour les métaux du sol.....	130
Figure 32. ACP pour les métaux dans l'eau d'abreuvement.....	134
Figure 33. Répartition des métaux lourds dans le lait selon la localisation de chaque élevage. .....	137
Figure 34. Analyse en composantes principales avec représentations de rotation pour les métaux dans le lait de chamelle. ....	139
Figure 35. Analyse en composantes principales avec représentations de rotation pour les concentrations de Plomb. ....	141
Figure 36. Analyse en composantes principales avec représentations de rotation pour les concentrations de Cadmium. ....	142
Figure 37. Analyse en composantes principales avec représentations de rotation pour les concentrations de Nickel. ....	143
Figure 38. Contribution de chaque métal à l'indice de danger par groupe de population.....	146

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Définitions des métaux lourds au fil du temps [102-116].	22
Tableau 2. Captation cellulaire des métaux lourds [153].	33
Tableau 3. Caractéristiques des articles de recherche inclus sur les niveaux de métaux dans le lait de chamelle.	44
Tableau 4. Concentration des métaux (Hg, Pb, Cd et Ni) dans le lait de chamelle $\mu\text{g}/\text{Kg}$ .	45
Tableau 5. Quotient de danger (HQ) pour les éléments toxiques (Hg, Pb, Cd et Ni) dans le lait de chamelle pour les adultes.	48
Tableau 6. Quotient de danger (HQ) pour les éléments toxiques (Hg, Pb, Cd et Ni) dans le lait de chamelle pour les enfants.	49
Tableau 7. Risque Cancérigène (RC) pour le Plomb et le Cadmium dans le lait de chamelle pour les adultes et les enfants.	50
Tableau 8. Identification botanique des certaines espèces prélevées lors de la campagne d'échantillonnage selon le catalogue des plantes spontanées du Sahara septentrional algérien [242].	71
Tableau 9. Programme de température et de pression pour la minéralisation du sol fourni par Analytik Jena [243].	74
Tableau 10. Programme thermique de la minéralisation de la matière végétale selon le protocole de Chaouali et al., (2018) [244].	75
Tableau 11. Programme thermique de la minéralisation du lait fourni par Analytik Jena [243].	76
Tableau 12. Programme thermique du four pour le dosage du Plomb.	78
Tableau 13. Programme thermique du four pour le dosage du Cadmium.	78
Tableau 14. Programme thermique du four pour le dosage du Nickel.	79
Tableau 15. Choix non exhaustif du nombre de standards d'étalonnage et de validation en fonction du protocole choisi [249-252].	81
Tableau 16. Résultats des tests de performance du dosage du Mercure dans l'eau et dans le lait.	85
Tableau 17. Classification de la turbidité de l'eau.	86
Tableau 18. Classification de l'intensité de pollution en fonction de l'index de géoaccumulation [240].	87

Tableau 19. Variables quantitatives étudiées et leur classification selon la distribution Normale ou non Normale. ....	90
Tableau 20. Séries d'étalonnage du Plomb dans le sol sur trois jours. ....	95
Tableau 21. Calcul des recouvrements pour la validation du Plomb dans le sol. ....	96
Tableau 22. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans le sol.....	96
Tableau 23. Limites de détection et de quantification du Plomb dans le sol. ....	97
Tableau 24. Séries d'étalonnage du Plomb dans le l'eau sur trois jours.....	98
Tableau 25. Calcul des recouvrements pour la validation du Plomb dans l'eau.....	98
Tableau 26. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans l'eau. ....	99
Tableau 27. Limites de détection et de quantification pour le dosage du Plomb dans l'eau. ....	100
Tableau 28. Séries d'étalonnage du Plomb dans les plantes sur trois jours. ....	101
Tableau 29. Calcul des recouvrements pour le Plomb dans les plantes. ....	101
Tableau 30. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans les plantes. ....	102
Tableau 31. Limites de détection et de quantification du Plomb dans les plantes. ....	103
Tableau 32. Séries d'étalonnage du Plomb dans le lait sur trois jours.....	103
Tableau 33. Calcul des recouvrements pour le dosage du Plomb dans le lait.....	104
Tableau 34. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans le lait. ....	104
Tableau 35. Limites de détection et de quantification du Plomb dans le lait.....	105
Tableau 36. Séries d'étalonnage du Cadmium dans le sol sur trois jours.....	106
Tableau 37. Calcul des recouvrements pour le dosage du Cadmium dans le sol.....	107
Tableau 38. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans le sol. ....	108
Tableau 39. Limites de détection et de quantification du Cadmium dans le sol.....	108
Tableau 40. Séries d'étalonnage du Cadmium dans le l'eau sur trois jours.....	109
Tableau 41. Calcul des recouvrements du Cadmium dans l'eau.....	110
Tableau 42. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans l'eau.....	110
Tableau 43. Limites de détection et de quantification du Cadmium dans l'eau. ....	111
Tableau 44. Séries d'étalonnage du Cadmium dans les plantes sur trois jours.....	112
Tableau 45. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans les plantes.....	112
Tableau 46. Calcul des recouvrements de la validation du Cadmium dans les plantes. ....	113
Tableau 47. Limites de détection et de quantification du Cadmium dans les plantes.....	114
Tableau 48. Séries d'étalonnage du Cadmium dans le lait sur trois jours. ....	114
Tableau 49. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans le lait.....	115
Tableau 50. Calcul des recouvrements de la validation du Cadmium dans le lait. ....	116



Tableau 51. Limites de détection et de quantification du Cadmium dans le lait. ....	116
Tableau 52. Séries d'étalonnage du Nickel dans le sol sur trois jours. ....	117
Tableau 53. Calcul des recouvrements du dosage du Nickel dans le sol. ....	118
Tableau 54. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans le sol. ....	118
Tableau 55. Limites de détection et de quantification du Nickel dans le sol. ....	119
Tableau 56. Séries d'étalonnage du Nickel dans le l'eau sur trois jours. ....	120
Tableau 57. Calcul des recouvrements du Nickel dans l'eau. ....	121
Tableau 58. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans l'eau. ....	121
Tableau 59. Limites de détection et de quantification du Nickel dans l'eau. ....	122
Tableau 60. Séries d'étalonnage du Nickel dans le lait sur trois jours. ....	123
Tableau 61. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans le lait. ....	123
Tableau 62. Limites de détection et de quantification du Nickel dans le lait. ....	124
Tableau 63. Récapitulatif des performances de chaque méthode analytique validée. ....	125
Tableau 64. Résultats des contrôles de qualités effectuées. ....	125
Tableau 65. Indicateurs de la pollution des élevages étudiés. ....	127
Tableau 66. Concentrations des éléments traces métalliques et coefficients de variations des sols échantillonnés. ....	128
Tableau 67. Variations saisonnières des concentrations des éléments métalliques dans le sol et test de Friedman. ....	128
Tableau 68. Distribution spatiale des métaux analysés dans les sols. Zone A : sol proche de station d'essence (moins de 5Km), Zone B : sols échantillonnés au-delà de 5Km. ....	129
Tableau 69. Corrélation entre les métaux pour les échantillons de sol. ....	129
Tableau 70. Valeurs Igeo des sols de élevages échantillonnés. ....	131
Tableau 71. Paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau d'abreuvement prélevés. ....	131
Tableau 72. Concentrations des éléments traces métalliques des eaux d'abreuvement échantillonnées. ....	132
Tableau 73. Variations saisonnières des concentrations des métaux dans les échantillons d'eau d'abreuvement et test de Friedman. ....	132
Tableau 74. Distribution spatiale des métaux analysés dans l'eau d'abreuvement. Zone A : site proche d'une station d'essence (moins de 5 km), zone B : site au-delà de 5 km. ....	133
Tableau 75. Corrélation entre les différents éléments pour les échantillons d'eau d'abreuvement. ....	133

Tableau 76. Concentrations des éléments traces métalliques des plantes échantillonnées....	134
Tableau 77. Concentrations des éléments traces métalliques au niveau des plantes en fonction des saisons et analyse de Friedman.....	135
Tableau 78. Distribution spatiale des métaux analysés dans les plantes. Zone A : site proche d'une station d'essence (moins de 5 Km), Zone B : site au-delà de 5 Km.....	135
Tableau 79. Corrélation entre les métaux pour les plantes.....	135
Tableau 80. Propriétés physico-chimiques des échantillons de lait de chamelle.....	136
Tableau 81. Concentrations des éléments traces métalliques dans les échantillons de lait de chamelle. ....	136
Tableau 82. Concentrations des éléments traces métalliques des échantillons de lait de chamelle en fonction des saisons et analyse ANOVA.....	138
Tableau 83. Distribution spatiale des métaux analysés dans les échantillons de lait. Zone A : site proche d'une station d'essence (moins de 5 Km), Zone B : site au-delà de 5 Km.....	138
Tableau 84. Corrélation entre les métaux pour les échantillons de lait.....	139
Tableau 85. Corrélation entre les différentes matrices pour le Plomb. ....	140
Tableau 86. Corrélation entre les différentes matrices pour le Cadmium.....	141
Tableau 87. Corrélation entre les différentes matrices pour le Nickel.....	142
Tableau 88. Statistiques descriptives des facteurs de transfert du Plomb et Cadmium pour le sol-plantes ( $FT_{sp}$ ) et plantes-lait ( $FT_{pl}$ ).....	144
Tableau 89. Apports journaliers estimés des éléments détectés dans le lait par rapport à leurs apports journaliers tolérables provisoires (DJTP).....	144
Tableau 90. Valeurs HQ pour les métaux étudiés suite à la consommation de lait de chamelle. ....	145
Tableau 91. Risque cancérigène et le risque cancérigène total calculés.....	147
Tableau 92. Comparaison des concentrations du Plomb (mg/Kg) de notre étude avec les sols de différentes régions.....	153
Tableau 93. Comparaison des concentrations du Plomb dans le lait de chamelle de notre étude ( $\mu\text{g/Kg}$ ) et de la littérature.....	168
Tableau 94. Comparaison des concentrations du Cadmium de notre étude ( $\mu\text{g/Kg}$ ) avec ceux de la littérature.....	171
Tableau 95. Comparaison des concentrations du Nickel retrouvées ( $\mu\text{g/Kg}$ ) avec celles de la littérature.....	173

## LISTE DES EQUATIONS

$EDI = C \times IR/BW$ (Équation 1).....	41
$HQ = EDI/RfD$ (Équation 2).....	41
$RC = Cm \times EF \times ED \times FIR \times 0.001 / (TA \times BW) \times CSF$ (Équation 3).....	42
Limite de Détection (LD) = (3.s blanc) /a (Équation 4).....	83
Limite de Quantification (LQ) = (10.s blanc) /a (Équation 5).....	83
Recouvrement (%) = Concentration trouvée–concentration ajoutée /concentration ajoutée (Équation 6).....	83
Élément métallique ( $\mu\text{g/Kg}$ ) = (C.V.F) /Pe (Équation 7).....	84
$I_{geo} = \log_2 (C_n/1.5 B_n)$ (Équation 8) .....	87
$FT_{sp} = C_p/C_s$ (Équation 9) .....	88
$FT_{pl} = C_l/C_p$ (Équation 10) .....	88
$HI = HQ_n = HQ_{Pb} + HQ_{Cd} + HQ_{Hg} + HQ_{Ni}$ (Équation 11) .....	89
$RCT = RC_n = RCP_{Pb} + RCC_{Cd}$ (Équation 12).....	90

# Introduction

## INTRODUCTION

Le lait et les produits laitiers contiennent des protéines, des matières grasses et d'autres éléments essentiels à la santé humaine, en particulier au métabolisme physiologique, à la croissance et au développement de l'organisme des nourrissons, des enfants et des adultes [1,2]. Les minéraux font partie entre autres des éléments essentiels du lait [3,4]. À titre d'exemple, le Calcium (Ca), le Cuivre (Cu) et le Sélénium (Se) sont essentiels aux fonctions du corps humain et sont impliqués dans de nombreux processus physiologiques tels que le maintien de l'intégrité osseuse [5]. C'est ainsi que la consommation quotidienne et régulière du lait est recommandée pour toutes les tranches d'âge, en particulier pour les enfants et les nourrissons [6,7].

D'après le rapport de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la consommation moyenne annuelle de cette denrée alimentaire (le lait) par habitant dans le monde est d'environ 100Kg et peut être très variable selon les pays et les régions du monde. Bien que l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) suggère que la consommation devrait être d'au moins 200Kg de lait/habitant/an, elle est supérieure à 300Kg en Europe occidentale contre moins de 30Kg dans certains pays d'Afrique et d'Asie [8,9].

En parallèle des éléments nutritifs, des éléments toxiques comme le Plomb (Pb) et le Cadmium (Cd), ou des oligo-éléments avec des effets néfastes, comme le Nickel (Ni), peuvent également être présents dans le lait et leur ingestion peut entraîner des problèmes de santé chroniques tels que le retard mental, les troubles neurologiques et rénaux, ainsi que les maladies cardiovasculaires ou encore même le cancer [7]. Les enfants, en raison de leur développement rapide et d'une consommation plus importante de lait par rapport aux adultes, sont plus susceptibles d'être affectés par les effets néfastes de ces éléments toxiques, mettant en danger leur santé à long terme [7, 10].

En Algérie, le lait représente une denrée alimentaire importante et est consommé par toutes les tranches d'âge. Dans le Sud du pays, les dromadaires (*Camelus dromedarius*) sont une part vitale de l'économie de la région. L'effectif camelin total est d'environ 150000 têtes et est surtout orienté vers la production de viande, la production de lait étant secondaire du fait de la faible productivité et de l'inexistence d'une industrie spécifique [11,12]. Selon les dernières statistiques de la FAO, l'Algérie compte un cheptel de 99017 chamelles laitières avec une production de 15284,26 tonnes de lait en 2021 [13]. Le lait de chamelle est surtout réputé pour ses vertus bénéfiques et est notamment donné aux personnes qui ont une intolérance au lactose ou aux personnes fragiles [14,15].



D'une façon générale, il faut noter que la production et la consommation du lait de chamelle ne sont pas tellement étudiées en Algérie et que les chiffres disponibles sont surtout obtenus sur la base d'enquêtes sporadiques et non de suivis sur une longue période [11].

D'après la littérature, les concentrations d'éléments bénéfiques et toxiques dans le lait des animaux d'élevage, dont le dromadaire fait partie, sont affectées par le fourrage, les aliments et l'eau consommés [16-18]. Au cours des dernières décennies, la croissance rapide de la population et l'industrialisation ont exercé une forte pression sur la qualité de l'environnement, en particulier dans les pays en développement avec une forte contamination en métaux lourds [19]. Les métaux toxiques, comme le Plomb, le Cadmium et le Nickel, émis par la pollution anthropique et présents dans l'environnement, peuvent entrer dans la chaîne alimentaire et potentiellement compromettre la qualité du lait, affectant ainsi la santé humaine. Une fois ingérés, ces métaux suivent diverses voies, certains étant excrétés, tandis que d'autres peuvent être mobilisés et transférés dans le lait, qui sera par la suite consommé [16-19].

L'Algérie a développé toute une stratégie économique autour de l'exploitation des gisements de ressources fossiles et minières avec pour conséquence une possible augmentation de la pollution métallique. Dans notre zone d'étude (Biskra, El Oued, Ouargla, Ghardaïa), il existe plusieurs complexes industriels d'extraction et de raffinerie, d'usines de fabrication de batteries et un trafic routier important le long de la route nationale. Des constatations préliminaires sur terrain montrent que l'environnement dans lequel évoluent les dromadaires dans cette zone est soumis à de multiples sources de pollutions. L'environnement étudié est susceptible d'être contaminé que ce soit par le Plomb avec les rejets automobiles et industriels (pétrole, industrie métallurgique, usine de batterie), par le Cadmium (industrie métallurgique, agriculture, automobiles) et par le Nickel (pétrole).

Ces activités industrielles posent un risque significatif pour la qualité du lait de chamelle dans la région. De sorte que si les animaux sont exposés à des quantités élevées de métaux toxiques, le lait par extension pourra devenir dangereux pour la santé des consommateurs [20]. Ainsi, les élevages de la région peuvent être fragilisés par les risques de pollution métallique d'autant plus qu'aucune législation concernant les valeurs limites des métaux lourds dans le lait n'est, à notre connaissance, codifiée et que cet aliment est vendu directement sans contrôle sanitaire, ni intermédiaire aux bords des routes (producteurs vers consommateurs).

Cependant, peu d'informations sur les concentrations d'éléments traces dans le lait de chamelle sont répertoriées que ce soit en Algérie ou à travers le monde.

C'est ainsi que se dirige notre travail qui permettra de mesurer la concentration des métaux lourds (Pb, Cd, Ni) dans le lait de chamelle (denrée alimentaire qui connaît une large utilisation dans les régions sahariennes, et commence à voir une expansion aux régions nordiques du pays), d'évaluer la qualité alimentaire, mais aussi de surveiller l'impact des activités humaines sur les sols, la végétation et l'eau d'abreuvement des élevages où se trouvent ces animaux.

Cette étude se situe au croisement entre la nutrition, la santé publique et l'environnement, mettant en lumière la nécessité de comprendre et d'atténuer les risques potentiels associés à la consommation de ce produit essentiel pour de nombreuses communautés locales. La détermination des concentrations résiduelles des métaux sera utilisée comme un « indicateur indirect » de la contamination environnementale et permettra d'avoir un état des lieux initial et d'évaluer le risque sanitaire des consommateurs surtout chez les personnes vulnérables comme les enfants.

## **1. Objectif principal**

Évaluer l'impact de la contamination métallique du lait de la chamelle au niveau du Sud-Est de l'Algérie par la mesure des concentrations du Plomb (Pb), Cadmium (Cd), Mercure (Hg) et du Nickel (Ni).

## **2. Objectifs secondaires**

- a. Validation des méthodes de dosage analytiques du dosage du Plomb, Cadmium et Nickel dans le lait de chamelle ainsi que dans le sol, l'eau d'abreuvement et les plantes des élevages camelin par spectrométrie d'absorption atomique avec four à graphite (SAA-FG) ;
- b. Évaluation des niveaux de pollution métallique autour des élevages de dromadaire par élaboration d'un indice de risque de pollution pour les élevages et la mesure des concentrations des métaux dans le sol, l'eau d'abreuvement et les plantes consommées par les dromadaires ;
- c. Calcul du risque cancérigène (Plomb et Cadmium) et non cancérigène (Plomb, Cadmium, Nickel, Mercure) lié à la consommation du lait de chamelle.

Pour la réalisation du présent travail, plusieurs techniques ont été mise en œuvre faisant appel à des disciplines aussi diverses que la cartographie, la toxicologie et les statistiques par la mise en œuvre d'un système d'indice pour localiser, identifier et évaluer semi-quantitativement les sources de pollution situées près des élevages échantillonnés ; de différentes méthodes pour la détermination des métaux lourds (Pb, Cd, Ni) dans les matrices environnementales et le lait de chamelle ; et enfin de techniques d'évaluation probabiliste du risque cancérigène et non cancérigène.

Enfin et en dépit du fait que le Mercure (Hg) ne soit pas inclus parmi les objectifs initiaux de la thèse, son incorporation dans les objectifs et son dosage dans le lait ont aussi été ajoutés pour enrichir la compréhension des risques potentiels pour la santé liés à l'exposition aux métaux lourds dans le lait de chamelle. Ceci s'explique par des raisons analytiques (automate de dosage du Mercure fonctionnel et méthode analytique déjà validée) et toxicologiques (propriétés toxiques et persistance dans l'environnement, élément fréquemment étudié dans les produits alimentaires).



SYNTHESE  
BIBLIOGRAPHIQUE

# Chapitre I

## Le lait de chamelle

Le dromadaire (*Camelus dromedarius*) occupe une place de choix dans les zones arides et semi-arides, en raison de son excellente adaptation aux mauvaises conditions de vie, tels que le manque d'eau et de pâturage et parvient à produire du lait et de la viande de bonne qualité [11,21]. Son adaptabilité unique le rend idéal pour l'exploitation face aux défis du réchauffement climatique et un parfait allié pour la sécurité alimentaire dans un climat changeant [22]. Le dromadaire, comme le chameau de Bactriane, fait partie des mammifères domestiqués par l'homme pour fournir du lait et de la viande destinée à la consommation humaine. En Afrique, le dromadaire est considéré comme une espèce d'élevage importante pour la production de viande, tandis que dans la péninsule arabique, une plus grande attention est accordée aux courses de chameaux [23].

## I.1. Généralités sur le dromadaire

### I.1.1. Taxonomie

Le nom dromadaire dérive du grec ancien « *dromados* », génitif de dromas, qui signifie "qui court" et est rapporté à son utilisation comme moyen de transport depuis des siècles [24].

Le dromadaire appartient au genre *Camelus* et à la famille des *Camélidae*. La famille des *Camélidae* ne comprend que deux genres : *Camelus* et *Lama*. Le genre *Camelus* occupe les régions désertiques de l'Ancien Monde (Afrique, Asie et Europe) et a donné naissance à deux espèces distinctes (*Camelus bactrianus*, *Camelus dromedarius*). Alors que le genre *Lama* est spécifique des déserts d'altitude du Nouveau Monde (les Amériques) où il a donné naissance à quatre espèces distinctes (*Lama glama*, *guanacoe*, *pacos*, *vicugna*) [21, 25].

Il existe 2 espèces distinctes de chameaux : *Camelus dromedarius* (également connu sous le nom de dromadaire, chameau d'Arabie ou chameau à une bosse) et le *Camelus bactrianus* (également connu sous le nom de Bactriane ou chameau à deux bosses) (Figure 1). Le Bactriane se trouve dans les régions désertiques froides d'Asie centrale, tandis que le dromadaire est originaire des déserts chauds d'Afrique du Nord et d'Asie occidentale [23,26].

De surcroît, une sous-espèce de chameau, parfois considérée comme une entité distincte de l'espèce domestique qu'est le chameau de Bactriane (*Camelus bactrianus*), est identifiée sous le nom de chameau sauvage de Tartarie (*Camelus bactrianus ferus*). Cette sous-espèce évolue dans des régions éloignées de Mongolie et de Chine [27].

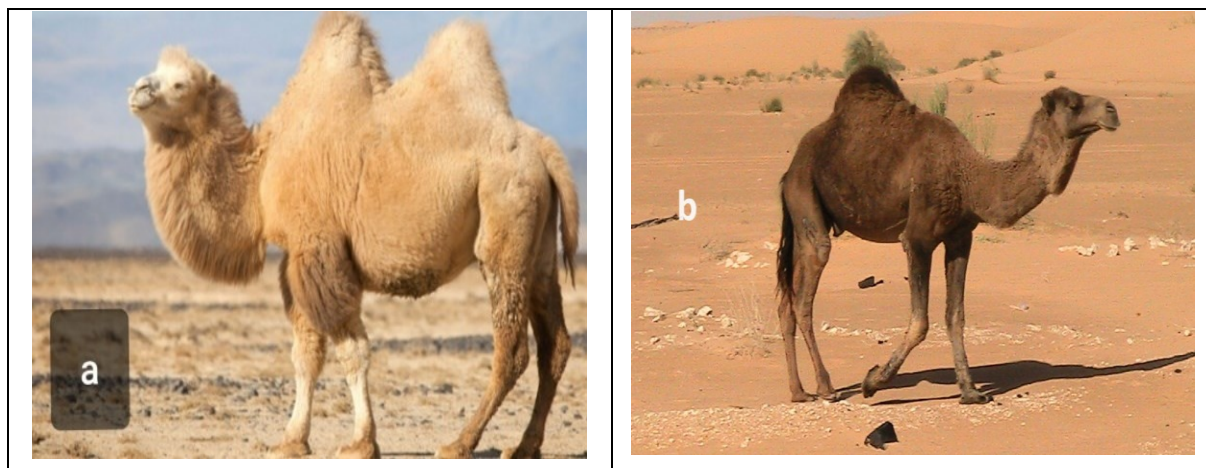


Figure 1. Les deux espèces principales de *Camélidae* (a) : *Camelus bactrianus*, (b) : *Camelus dromedarius* [12].

### I.1.2. Répartition géographique des dromadaires

#### A. Distribution mondiale des dromadaires

Le recensement précis des camelins dans le monde est difficile, d'abord, parce qu'il s'agit essentiellement d'animaux élevés par des populations nomades, qui se déplacent fréquemment, d'une part et d'autre part, parce qu'il n'y a pas de vaccination obligatoire pour ces animaux [27]. Selon la FAO, le nombre total de dromadaires dans le monde est d'environ 35 millions de têtes, dont 1 million de chameaux de Bactriane [28, 29]. Sur les 34 millions de dromadaires, environ 86% (plus de 30 millions) se trouvent en Afrique, avec la plus grande population en Afrique orientale et centrale (Somalie, Tchad, Soudan, Éthiopie et Kenya) (Figure 2).

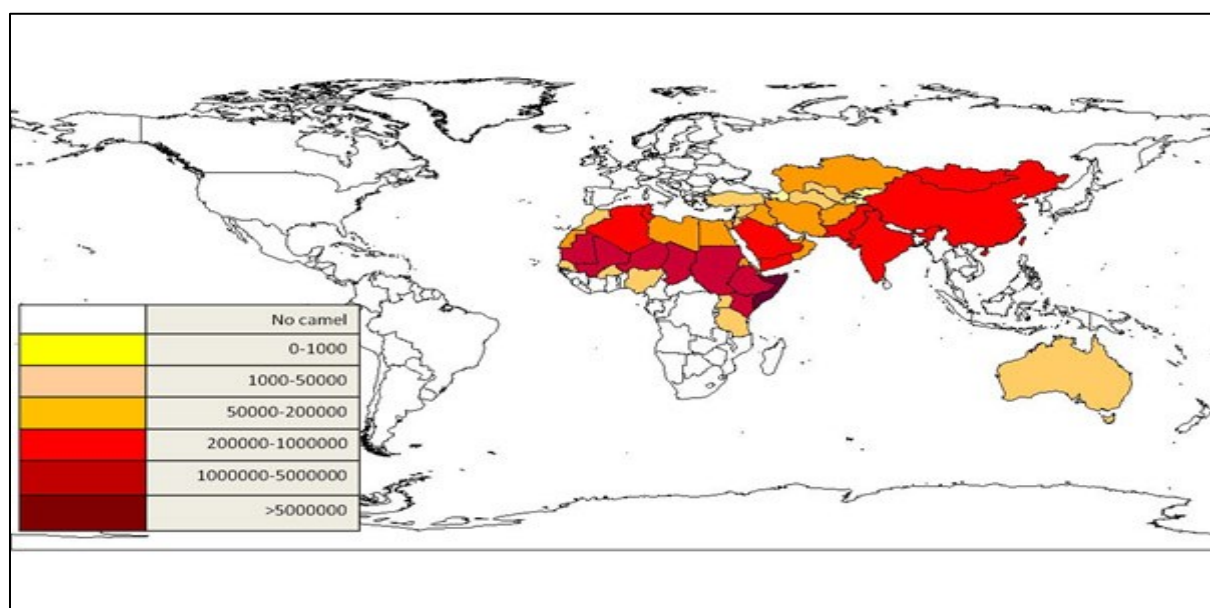


Figure 2. Répartition mondiale des dromadaires [13].

Depuis 1961, le nombre de dromadaires dans le monde a plus que doublé. Selon Faye (2020), la croissance des effectifs camelin n'est pas uniforme dans tous les pays [31]. Cinq types de tendances sont à signaler :

- Pays à forte croissance récente (Algérie, Tchad, Mali, Mauritanie, Oman, Qatar, Syrie, Émirats Arabes Unis, Yémen, Éthiopie et Érythrée) ;
- Pays à croissance régulière (Bahreïn, Burkina Faso, Djibouti, Égypte, Iran, Kenya, Niger, Nigeria, Pakistan, Arabie saoudite, Somalie, Soudan, Tunisie et Sahara Occidental) ;
- Pays ayant un nombre stable (Liban, Libye et Sénégal) ;
- Pays avec une diminution du nombre de dromadaires (Afghanistan, Chine, Inde, Jordanie, Mongolie et ex-URSS) ;
- Pays, à haut déclin du nombre de dromadaires (Irak, Maroc et Turquie) [31].

### **B. Distribution des dromadaires en Algérie**

En Algérie, l'ensemble du cheptel camelin est constitué exclusivement de dromadaires de l'espèce *Camelus dromedarius* [11]. Le dromadaire est présent dans 17 Wilayas (8 sahariennes et 9 steppiques). L'effectif camelin algérien a été estimé de 99017 chameilles laitières par la FAO [13]. Ce chiffre situe l'Algérie au 14<sup>ème</sup> rang mondial et au 6<sup>ème</sup> rang du monde arabe. Le cheptel camelin est réparti sur trois principales zones d'élevage : le sud-est, le sud-ouest et l'extrême sud avec respectivement 52%, 18% et 30% de l'effectif total [21]. Cet élevage suscite une activité socio-économique intéressante vu qu'il représente un atout incontestable dans la sécurisation alimentaire des régions désertiques et arides [32].

Il existe deux grands modes d'élevage des dromadaires en Algérie : l'élevage en extensif (pratiqué dans des parcours de vastes superficies et qui se base sur la végétation naturelle) et l'élevage en intensif (en limitation et qui se base sur l'utilisation des complémentations alimentaires).

L'élevage intensif est basé sur l'exploitation des ressources alimentaires situées à proximité de l'habitat fixe, et sur les produits de l'agriculture. Les troupeaux sont en général de petite taille. Ce système semble se développer ces dernières années, suite à l'augmentation de l'utilisation et de la vente du lait de chamelle en Algérie. À la limite de ces deux modes, s'ajoute un autre système d'élevage intermédiaire, c'est le mode semi-intensif [33].

### C. Production et consommation du lait de chamelle en Algérie

La consommation algérienne de lait connaît une évolution croissante depuis l'indépendance. En 2023, l'Algérie a été classée comme un pays où la consommation est « moyenne » avec une valeur allant de 30 à 150Kg/habitant/an [34]. La poussée démographique ainsi que l'amélioration du niveau de vie de la population ont induit une forte demande de ce produit. Par ailleurs, l'insuffisance de la production nationale astreint l'Algérie à recourir depuis plusieurs années à des importations massives de lait sous forme de poudre, de matière grasse et de produits dérivés. Le lait reconstitué et le lait de vache représentent 98,8% de la production laitière nationale. La chèvre, la brebis et la chamelle restent des espèces marginalisées dans la production laitière [35]. Cependant, Belhadia et al., (2014) ont rapporté qu'une quantité non négligeable de lait cru est vendue à travers le pays de façon non contrôlée et qui ne figurent pas dans les données officielles ; les chiffres sont donc sous-estimés [36].

Selon Faye (2023), les performances de la chamelle sont trois fois plus importantes que celles des vaches placées dans les mêmes conditions d'élevage [37]. Le potentiel de production de lait de chamelle reste cependant, peu connu pour le grand public. Ceci est dû au fait que la production laitière cameline a été longtemps destinée à l'autoconsommation et comme un don pour les plus démunis ou les hôtes de passage [26]. Selon la FAO, et comme montré dans la Figure 3, la consommation du lait de chamelle est très faible en Algérie ne dépassant pas les dix litres par habitant et par an [30].

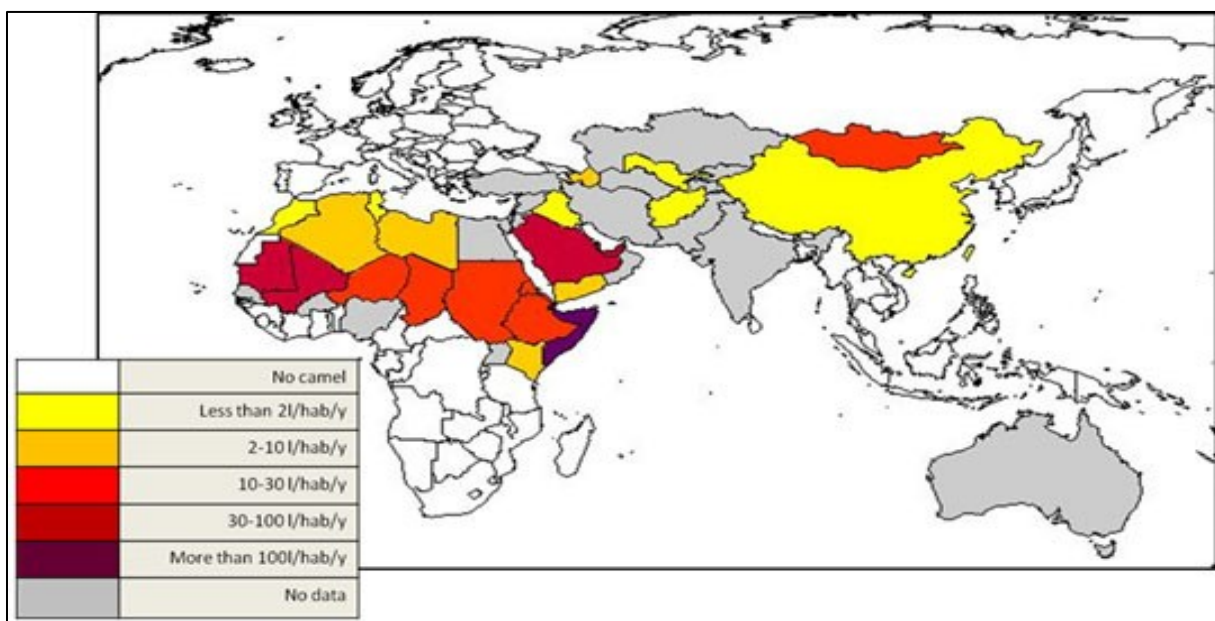


Figure 3. Consommation moyenne annuelle par habitant de lait de chamelle [30].

À l'exception de certaines exploitations disposant d'usines (comme dans la ville d'Oued Souf), le plus souvent, la vente de lait de chamelle se limite à de petits magasins dans les villes du sud, ou des élevages de type intensif au bord des routes. Il est à remarquer que le lait de chamelle est peu disponible dans les principales supérettes du nord du pays et que ce lait est vendu à un prix allant de 300 à 500 Dinars Algérien le litre.

## **I.2. Caractéristiques du lait de chamelle**

La production et la composition du lait sont affectées par l'espèce, la race, l'âge, la santé de l'animal, le stade de lactation, la parité, la saison, l'alimentation, les conditions de traite (fréquence, présence du chamelon et mode de traite : traite à la main ou à la machine) et la disponibilité en eau [38-40].

Il est difficile d'estimer la production laitière quotidienne d'une chamelle, en raison de l'incohérence de la fréquence de traite. La production laitière totale individuelle des chamelles varie de 1000 à 12000 litres pendant une période de lactation de 8 à 18 mois avec de grandes différences entre les régions géographiques [41]. Le rendement des chamelles maghrébines dans des conditions favorables augmente jusqu'à 6-12l/jour, alors que le rendement dans des conditions extensives traditionnelles est en moyenne de 2 l/jour [42].

En général, les deux moitiés de pis sont traites en même temps par deux chameliers, mais avant la traite, le chamelon est autorisé à téter jusqu'à ce que le lait commence à couler, puis la chamelle est traitée [1]. Sans cette stimulation, il est difficile, voire impossible, de traire la chamelle. Si le chamelon meurt, il suffit souvent que la mère voie la peau de son chamelon pour que la sécrétion lactée soit stimulée [43].

### **I.2.1. Caractéristiques physico-chimiques du lait de chamelle**

Les principales propriétés physico-chimiques de l'industrie laitière sont la densité, le point de congélation et le pH. Le lait de chamelle est de couleur blanche, en raison notamment de la structure et de la composition de sa matière grasse, relativement pauvre en  $\beta$ -carotène [44,45]. Il est légèrement sucré, avec un goût acide, parfois même salé et/ou amer. Cette variabilité dans le goût est liée au type de fourrage ingéré ainsi qu'à la disponibilité en eau [46].

Le pH du lait de chamelle est similaire à celui du lait de brebis, mais un peu acide par rapport à celui du lait bovin, ce dernier se situe entre 6,6 et 6,8. Cette acidité provient essentiellement, des protéines, des phosphates et du CO<sub>2</sub> dissous présents dans le lait [47].

Le lait acquiert ensuite une acidité, dite « acidité développée », car elle est provoquée par l'acide lactique et autres acides issus de la dégradation des sucres par les micro-organismes. Comparé au lait de vache, le lait de chamelle s'acidifie très lentement et peut être conservé plus longtemps sans réfrigération [48].

La densité moyenne du lait de chamelle est de  $1,028 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$  et son point de congélation varie entre  $-0,57^\circ\text{C}$  à  $-0,61^\circ\text{C}$ . Il est inférieur à celui du lait de vache qui se situe entre  $-0,51^\circ\text{C}$  et  $-0,56^\circ\text{C}$ . Une plus grande concentration de sel dans le lait de chamelle par rapport au lait de vache pourrait être à l'origine de ce résultat [49]. Enfin, la valeur calorique du lait de chamelle (665 kcal/l) est presque similaire à celle du lait de vache (701 kcal/l) [49].

### **I.2.2. Composition chimique du lait de chamelle**

La composition chimique globale du lait de chamelle, même si elle fluctue selon les auteurs (selon l'environnement de l'étude), montre des teneurs importantes et équilibrées en nutriments de base (protéines, matière grasse et lactose) avec des proportions similaires à celles présentes dans le lait de vache [47]. Le lait de chamelle est pauvre en cholestérol, en sucre et en protéines, mais riche en minéraux (Sodium, Potassium, Fer, Cuivre, Zinc et Magnésium). Plusieurs études ont montré que le lait de chamelle contient diverses vitamines hydrosolubles et liposolubles, telles que les vitamines des groupes A, C, D, E et B avec une teneur globale en vitamines d'environ 3,7g/l [35].

#### **A. Teneur en eau**

La teneur en eau du lait de chamelle peut fluctuer de 84 à 90%. Cette variation est attribuée à la variation de l'alimentation animale, de la disponibilité et de la consommation d'eau. Lorsque les dromadaires ont libre accès à l'eau, la teneur en eau du lait est de 86%, mais lorsque l'eau est restreinte, la teneur en eau du lait augmente à 90%. Ainsi, il semblerait que la chamelle en lactation perd de l'eau au profit du lait en période de sécheresse, c'est-à-dire que les chamelles produisent du lait dilué par temps chaud lorsque l'eau est rare [48].

#### **B. Teneur en matière grasse**

La matière grasse du lait est considérée comme une source d'énergie. Elle agit comme un solvant pour les vitamines liposolubles et fournit des acides gras essentiels. La teneur en matière grasse du lait de dromadaire est comprise entre 1,2 et 6,4% avec une moyenne de 3,5% [48].



### C. Teneur en protéines

De par leur apport nutritionnel (source d'acides aminés essentiels), les protéines du lait revêtent une importance considérable au double plan quantitatif et qualitatif. La teneur moyenne en protéines dans le lait de chamelle est comparable à celle du lait bovin avec une concentration autour de 33g/l [43].

Selon leur solubilité en milieu acide, les protéines du lait de chamelle se répartissent, comme pour les laits d'autres espèces, en deux fractions : les caséines et les protéines du lactosérum (albumines et globulines). Les premières précipitent à leur pH isoélectrique se situant à 4,3 alors que les autres restent solubles dans cette zone de pH considérée [43].

La caséine du lait de chamelle diffère de la caséine du lait de vache en termes de distribution de taille micellaire en ce sens qu'il y a un plus grand nombre de grosses micelles dans le lait de chamelle que dans le lait de vache. Le lait de chamelle ne coagule pas facilement et, par conséquent, il est difficile de fabriquer des produits fermentés tels que du fromage et du yaourt à partir de lait de chamelle [43].

La difficulté de fabrication de produits à partir de lait de chamelle est attribuée aux propriétés structurelles et fonctionnelles uniques des protéines, en particulier des faibles quantités de caséine kappa qui provoquent la destruction du réseau de caséine lors de la coupe et la perte de matière sèche du fromage au lactosérum [43]. Le lait de chamelle est plus similaire au lait humain, car il contient une concentration plus élevée de  $\beta$ -caséine [49].

L'abondance de  $\beta$ -caséine dans le lait de chamelle est considérée comme l'une des principales raisons de la digestibilité facile du lait de chamelle pour les nourrissons humains, car la  $\beta$ -caséine est moins résistante à l'hydrolyse des peptides que l' $\alpha$ -caséine [50].

Le deuxième composant le plus important sont les protéines de lactosérum qui représentent 20 à 25% des protéines totales. Les immunoglobulines, la lactoferrine, la lactophorine, la lactoperoxydase, le lysozyme, les protéines de reconnaissance des peptidoglycanes, l'albumine sérique et l' $\alpha$ -lactalbumine sont les principales protéines de lactosérum présentes [51].

La comparaison des protéines de lactosérum de lait de chamelle avec celles du lait de vache a montré une composition différente, où la  $\beta$ -lactoglobuline, qui n'est pas présente dans le lait de chamelle, est le composant principal du lait de vache et l' $\alpha$ -lactalbumine est le composant principal du lait de chamelle [52].

#### D. Teneur en minéraux

La teneur totale en minéraux des chamelles varie de 0,60 à 0,90% avec une moyenne de  $0,79 \pm 0,07\%$ , ce qui est généralement appelé cendres totales [49]. Chaque 100g de lait de chamelle apporte du Calcium (114-116mg), du Phosphore (87,4mg), du Potassium (144-156mg), du Sodium (59mg), du Magnésium (10,5-12,3mg), du Fer (230-290 $\mu$ g), du Zinc (Zn) (530-590 $\mu$ g), du Manganèse (80 $\mu$ g) et du Cuivre (140 $\mu$ g) [53]. Plusieurs auteurs ont rapporté des teneurs significativement plus élevées en Cuivre, Fer, Sodium et Potassium dans le lait de chamelle par rapport au le lait de vache [45,46,49].

La présence d'une teneur plus élevée en Sodium et Potassium est attribuée à la consommation par les chameaux de fourrages riches en sel, ce qui est responsable du goût salé du lait de chamelle [54].

La concentration en Fer dans le lait de chamelle est six fois supérieure à celle du lait de vache [54]. Le Fer est présent en tant que composant majeur de la protéine liant le Fer, la lactoferrine [55]. Le Fer joue un rôle essentiel dans les réactions de transport d'électrons, la synthèse de l'acide désoxyribonucléique (ADN), le transport de l'oxygène, la régulation des gènes et est un composant de diverses protéines de stockage [56].

Le Zinc et le Cuivre possèdent une propriété anti-oxydante étendue et protègent les cellules du corps contre les dommages induits par le stress oxydatif [57]. La teneur plus élevée en Zinc dans le lait de chamelle joue un rôle clé dans l'activité sécrétoire de l'insuline à partir des îlots de cellules  $\beta$  de Langerhans et dans l'interaction de l'insuline avec ses récepteurs [58].

#### E. Teneur en vitamines

Le lait de chamelle est enrichi en vitamines hydrosolubles et liposolubles, telles que le complexe de vitamines A, B, C, D et E [59]. Le lait de chamelle est très nutritif ; un quart de litre (250ml) fournit environ 10,5% de vitamine C (acide ascorbique), de vitamine B1 (thiamine) et de vitamine B6 (pyridoxine), ainsi que 8,2% de vitamine B2 (riboflavine), 15,5% de vitamine B12 (cobalamine) et 5,25% de vitamine A (rétinol) des apports recommandés quotidiens [59]. Cependant, comparé au lait de vache, il présente une teneur similaire en vitamine E (0,56mg/l vs 0,60mg/l pour le lait de vache). De plus, le contenu d'autres vitamines est comparativement inférieur, comme la vitamine B12, l'acide pantothénique et la vitamine A [49]. Faye et al., (2019) ont rapporté que le lait de chamelle est riche en vitamine C et dans une moindre mesure en vitamine B3 (niacine) et en vitamine D, les concentrations des autres vitamines ne sont pas différentes du lait des autres espèces [61].

## F. Teneur en lactose

La teneur en lactose du lait de chamelle varie de 4,8 à 5,8% et est légèrement supérieure à la teneur en lactose du lait de vache [15]. Bien que le lait de chamelle contienne des quantités de lactose comparables à celles du lait de vache, les personnes intolérantes au lactose peuvent consommer du lait de chamelle avec peu de symptômes et il est plus facilement métabolisé [15]. L'explication suggérée est que le lait de chamelle produit moins de casomorphines que le lait de vache, ce qui provoquerait moins de motilité intestinale et rendrait le lactose plus sensible à l'action de la lactase [15].

## I.3. Potentiels thérapeutiques du lait de chamelle

Le lait de chamelle est généralement consommé dans diverses régions du monde pour ses « *potentielles propriétés curatives et préventives* » contre certaines pathologies [62,63].

Les indications les plus couramment reportées à son utilisation comprennent le diabète, les allergies et les intolérances au lactose, les troubles immunitaires et le cancer [64,65]. De plus, il a été constaté que le lait de chamelle est le plus proche de la composition du lait maternel diminuant ainsi les risques d'intolérance [63].

Bien qu'il soit traditionnellement utilisé au Moyen-Orient et en Afrique, l'avènement de la vente en ligne et la mode de l'utilisation des « produits naturels » ont accru sa disponibilité dans les pays occidentaux comme aux Etats-Unis d'Amérique et en Europe [66].

La justification scientifique de l'utilisation du lait de chamelle provient principalement de ses prétendus attributs antioxydants, immunomodulateurs, anti-inflammatoires, analogues à l'insuline et anti-apoptotiques. Ces propriétés ont été largement identifiées par des études in vitro et ne fournissent donc que des mécanismes hypothétiques de bénéfice [67-69].

Il existe plusieurs études sur les animaux et sur les humains, cependant elles sont pour la plupart de petite taille. De plus, l'efficacité clinique du lait de chamelle en tant qu'agent thérapeutique n'est actuellement pas claire. Cependant, les croyances des patients peuvent conduire à l'utilisation de cet agent comme alternative thérapeutique ou produit de santé complémentaire aux pratiques médicales modernes [70].

### I.3.1. Rôle dans le diabète

Les études in vitro rapportent la présence d'une substance analogue à l'insuline dans le lait de chamelle et qui explique le rôle de ce lait pour contrôler le diabète [71,72].

Ayoub et al., (2018) expliquent l'effet antidiabétique du lait de chamelle par une teneur plus élevée en insuline (52U/l) et en protéines analogues à l'insuline contenue dans le lait [73].

Il a également été rapporté que la protéine de lactosérum de chameau et ses hydrolysats générés par la pepsine pouvaient avoir un impact positif sur l'activation des récepteurs de l'insuline et ses voies de signalisation conduisant à une plus grande absorption de glucose dans les modèles de lignée cellulaire [74,75].

Les études sur les animaux atteints de diabète artificiellement par la streptozocine (substance expérimentale utilisée pour provoquer le diabète), ont montré une tendance à l'amélioration de la glycémie à jeun, à la diminution des besoins en insuline et à l'amélioration des pathologies associées au diabète (amélioration de la dyslipidémie, de la fonction hépatique et de la néphropathie diabétique) après gavage par du lait de chamelle [76-79].

De leur côté, Khan et al., (2013) ont découvert que les rats diabétiques présentaient une diminution de poids de 24,8% par rapport aux témoins et que le lait de chamelle augmentait le poids corporel à un niveau proche de la normale [80].

Pour les êtres humains, plusieurs études cliniques ont évalué les effets du lait de chamelle sur la prévention et le traitement du diabète de type 1 et 2. Ces études sont limitées, avec peu de patients et de mauvaise qualité méthodologique. Elles ont cependant montré un avantage potentiel dans la réduction de la glycémie à jeun, de l'hémoglobine glyquée et de la dose quotidienne d'insuline requise pour réguler le diabète au détriment d'une augmentation de l'indice de masse corporelle [81-85].

Malgré les avantages potentiels, le lait de chamelle ne peut pas être recommandé comme agent thérapeutique pour les patients diabétiques. Cependant, il ne semble pas y avoir de risques associés à une utilisation alimentaire complémentaire sur la base de ces études.

### **I.3.2. Rôle contre l'intolérance au lactose et les allergies**

Le lait de chamelle convient aux personnes intolérantes au lactose au contraire du lait de vache en raison de sa composition différente du lait de vache [86-88]. L'hypersensibilité aux protéines du lait bovin est une source d'allergie alimentaire qui touche principalement les nourrissons. La majorité des enfants souffrant d'allergie aux protéines de lait bovin synthétisent des anticorps principalement dirigés contre la  $\beta$ -lactoglobuline et l' $\alpha$ -caséine [89].

Une étude menée par Shabo et al., (2005) sur des enfants souffrant d'allergies au lait, a révélé que les enfants supplémentés avec du lait de chamelle présentaient une guérison complète des symptômes d'allergie dans les quatre jours suivant l'expérience [90].

De plus, de nombreuses études ont montré que le lait de chamelle ne provoque pas les réactions immunitaires causées par le lait de vache [52]. Ceci est dû à la différence entre les protéines du lait de chamelle et de vache qui le rend adapté pour les préparations pour nourrissons [90].

### **I.3.3. Rôle dans le cancer**

Plusieurs études ont évalué les effets du lait de chamelle sur l'angiogenèse et la prolifération cellulaire, ainsi que ses effets antioxydants et anti-génotoxiques potentiels. Ces études restent cependant limitées et ont besoin de plus de soutien scientifique pour confirmer le rôle contre le cancer. À titre d'exemple, Alhaider et al., (2014) ont montré des niveaux de facteur de croissance endothélial vasculaire (VEGF) plus faibles dans les groupes où il y'avait une administration de lait de chamelle [91].

Les effets anti-génotoxiques ont été également étudiés en utilisant des groupes de souris ayant reçu différentes quantités et combinaisons de lait de chamelle et de cisplatine, ainsi qu'un groupe de témoins. L'objectif de l'étude était d'évaluer le rôle potentiel du lait de chamelle contre les effets génotoxiques du cisplatine. Les résultats ont montré une diminution significative de la fréquence des érythrocytes polychromatiques micronucléés et une augmentation de l'indice mitotique dans les groupes traités avec du lait de chamelle. Ces marqueurs sont considérés comme des marqueurs des effets clastogènes et cytotoxiques du cisplatine [92].

### **I.3.4. Effet antidiarrhéique**

Le lait de chamelle fermenté contient des quantités plus élevées de Na et de K ainsi que des peptides bioactifs, tels que la lactoferrine, la lactoperoxydase, le lysozyme, l'immunoglobuline et le peptidoglycane, ce qui lui permet de réduire la fréquence et d'améliorer les symptômes de la diarrhée dans la maladie de Crohn et dans l'autisme [63, 88].

### **I.3.5. Rôle contre les infections**

Plusieurs auteurs ont émis l'hypothèse que la teneur élevée en lactoferrine et en immunoglobuline G du lait de chamelle pourrait protéger les consommateurs de différents agents infectieux [52]. De plus, l'immunoglobuline dans le lait de chamelle est similaire à celle du corps humain, avec une concentration plus élevée [53].



Le lait de chamelle contient également des antioxydants qui améliorent la fonction du système immunitaire, prévenant ainsi efficacement les infections [50]. Cardoso et al., (2013) ont publié une étude sur les effets du lait de chamelle par rapport au lait de vache sur la survie de souris infectées par *Salmonella enterica*. Les souris traitées au lait de chamelle ont montré une survie statistiquement significative par rapport au groupe lait de vache, mais une survie significativement réduite par rapport aux souris non infectées [93].

### **I.3.6. Rôle contre l'autisme**

L'autisme est un trouble neuro-développemental sévère qui se caractérise par une altération de la communication verbale et non verbale, de l'imagination, de l'interaction sociale et des signes de retard de développement au cours des trois premières années de la vie [94]. Il a été rapporté que le lait de chamelle possède des effets thérapeutiques potentiels chez les patients souffrant d'autisme comme une intervention thérapeutique prometteuse [94-96].

Selon une étude récente, les enfants autistes qui consommaient du lait de chamelle présentaient une réduction des symptômes autistiques et une amélioration de la motricité, du langage, de la cognition et de la coordination articulaire [97]. Cependant, ces études ne permettent pas de savoir si les améliorations identifiées sont corrélées avec des améliorations cliniquement pertinentes.

### **I.3.7. Autres effets potentiels**

Deux études ont montré les effets bénéfiques du lait de chamelle sur des rats atteints d'anémie induite par les métaux lourds [98, 99]. La première étude a montré que le traitement au lait de chamelle a amélioré de manière significative l'anémie et a diminué les marqueurs du stress oxydatif après exposition au Cadmium. La seconde étude a porté sur le dysfonctionnement rénal et hépatique et les marqueurs de stress oxydatif induit par le chlorure d'Aluminium. Tout comme pour le Cadmium, des résultats bénéfiques ont été rapportés. Enfin, une dernière étude a mis en évidence les propriétés anti-oxydantes, anti-inflammatoires et anti-apoptotiques du lait de chamelle contre les dommages induites par l'alcool éthylique sur les souris [100].

## Chapitre II

Contaminants du lait et profils  
toxicologiques des métaux lourds

## CHAPITRE II CONTAMINANTS DU LAIT ET PROFILS TOXICOLOGIQUES DES METAUX LOURDS

---

Pour évaluer le risque d'exposition aux métaux toxiques liée à l'ingestion de lait de chamelle, il est indispensable de connaître les différents types de contaminants chimiques pouvant être présents dans le lait, les profils toxicologiques des métaux lourds ainsi que leur mécanisme de transfert dans le lait. Ce chapitre exposera les principales caractéristiques toxicologiques des métaux abordés dans la partie pratique.

### II.1. Contaminants du lait

Le lait est exposé à divers risques de contamination, tant d'origines biologiques que chimiques. Les risques biologiques découlent principalement de la traite des animaux, exposant ainsi les mamelles à l'environnement et aux équipements. La contamination chimique, quant à elle, provient de multiples sources telles que l'utilisation d'agrochimiques, de produits vétérinaires, d'aliments et de fourrages contaminés, ainsi que de l'usage inapproprié de produits chimiques pendant les phases de production, de transformation et d'emballage du lait [6]. Les contaminants environnementaux fréquents incluent les mycotoxines, les pesticides et les métaux, absorbés par les animaux à travers leur alimentation, les fourrages et l'eau. De plus, des antibiotiques et des hormones sont aussi administrés par divers moyens, tels que la voie orale, l'injection ou les infusions intra-mammaires, dans le but de traiter les maladies, stimuler la croissance animale et accroître la production laitière [6,9].

#### II.1.1. Contaminants microbiens

La contamination microbienne du lait cru peut résulter d'une manipulation incorrecte dans les exploitations laitières, les équipements de traite, les sources d'eau, l'alimentation des animaux, ainsi que les ustensiles et équipements utilisés pour le stockage du lait à la ferme ou pendant le transport. De même, des pratiques d'hygiène inadéquates au sein de l'industrie laitière peuvent contribuer à la contamination microbienne. La consommation de lait contaminé par des micro-organismes pathogènes tels que *Campylobacter*, *Salmonella*, *Yersinia*, *E. coli*, *Listeria* et *S. aureus* peut entraîner des douleurs musculaires et abdominales, des maladies gastro-intestinales avec diarrhée, fièvre et nausées. Ces micro-organismes sont fréquemment présents dans la flore intestinale ou dans le pis des vaches, facilitant ainsi la contamination du lait [9].



### II.1.2. Contaminants chimiques

#### A. Pesticides

Divers résidus de pesticides ont été signalés en quantités détectables dans le lait cru, le lait pasteurisé et le lait UHT par divers auteurs à travers le monde. Ces occurrences sont attribuées, entre autres, aux propriétés lipophiles et à la résistance à la biodégradation de ces contaminants. Plusieurs pesticides, dont le DDT, l'aldrine, l'époxyde d'heptachlore, le lindane, le méthoxychlor, le diazinon et le deltaméthrine, ont été identifiés dans des échantillons d'eau prélevés dans des exploitations laitières. Les pesticides présentent un risque significatif pour la santé, même lorsqu'ils sont présents en dessous des niveaux maximums autorisés, et ont été associés à des affections telles que la maladie de Hodgkin, les lymphomes non hodgkiniens, la maladie de Parkinson, la perturbation endocrinienne, ainsi que des troubles respiratoires et reproducteurs [1].

#### B. Antibiotiques

Les antibiotiques sont couramment utilisés en élevage à des fins thérapeutiques, prophylactiques et comme promoteurs de croissance. Les résidus de ces antibiotiques, lorsqu'ils sont utilisés comme promoteurs de croissance ou à des fins thérapeutiques, peuvent être éliminés par le lait, en fonction de facteurs tels que la dose, la voie d'administration, le niveau de production de lait et le temps entre le traitement et la traite. La consommation de lait contaminé par les antibiotiques peut entraîner des effets indésirables tels que la perturbation endocrinienne et la résistance bactérienne [1].

#### C. Mycotoxines

Les mycotoxines, produites naturellement par des champignons tels qu'*Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium*, sont une préoccupation majeure en raison de leur impact sur la qualité des produits alimentaires et de leur potentiel risque pour la santé humaine. En particulier, l'aflatoxine M1, produite par le métabolisme de l'aflatoxine B1 dans le foie des animaux contaminés, est un contaminant courant dans le lait [6].

#### D. Métaux lourds

Les métaux, provenant de sources naturelles ou d'activités industrielles et agricoles, peuvent atteindre le lait par divers moyens tels que l'ingestion d'aliments contaminés, de fourrage ou d'eau potable contaminée [3].



### II.2. Définition d'un métal lourd

Le terme « métaux lourds » ou « éléments traces métalliques (ETM) » n'a jamais été défini convenablement. Au cours des 60 dernières années, plusieurs définitions basées chacune sur un critère donné ont été proposées [101]. Le Tableau 1 illustre de manière explicite toute la confusion entourant le terme.

**Tableau 1. Définitions des métaux lourds au fil du temps [102-116].**

<b>Définitions en termes de densité g/cm<sup>3</sup></b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Les métaux lourds ont une densité supérieure à 7 [102] ;</li><li>- Métaux ayant une densité supérieure à 4 [103, 104] ;</li><li>- Métaux ayant une densité de 5 ou plus [105] ;</li><li>- Métaux ayant une densité supérieure à 5 [106] ;</li><li>- Métaux avec une densité supérieure à 6 [107] ;</li><li>- Métaux avec une densité supérieure à 4,5 [108] ;</li><li>- Métaux ayant une densité comprise entre 3,5 et 5 [109] ;</li><li>- Métaux ayant une densité supérieure à 6 [110].</li></ul>
<b>Définitions en termes de masse atomique</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Éléments métalliques ayant un poids atomique assez élevé tel que le Mercure, Chrome, Cadmium, Arsenic et Plomb et qui ont tendance à s'accumuler dans la chaîne alimentaire [111] ;</li><li>- Métaux ayant un poids atomique supérieur à 40 [112] ;</li><li>- Terme collectif regroupant tous les métaux de masse atomique élevé, en particulier les métaux de transitions toxiques tels que le Plomb, le Mercure et le Cadmium [113].</li></ul>
<b>Définitions en termes de nombre atomique</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Tout métal avec un numéro atomique élevé à celui du Calcium [114] ;</li><li>- Tout métal avec un numéro atomique entre 21 (Scandium) et 92 (Uranium) [115] ;</li><li>- Terme souvent utilisé pour désigner tout métal avec numéro atomique supérieur à 20 [116].</li></ul>

## CHAPITRE II CONTAMINANTS DU LAIT ET PROFILS TOXICOLOGIQUES DES METAUX LOURDS

---

Les métaux lourds sont des éléments toxiques qui s'accumulent et peuvent causer des dommages, même à des niveaux très faibles. Ils n'ont pratiquement aucune fonction métabolique connue, mais lorsqu'ils sont présents dans le corps, ils perturbent les processus cellulaires normaux, ce qui entraîne des effets toxiques dans divers organes [117,118]. Toutefois, il convient de noter que des exceptions existent pour certains éléments métalliques, comme le Nickel, qui, bien que ne participant généralement pas à des fonctions métaboliques, peut parfois jouer un rôle spécifique dans certaines réactions enzymatiques ou processus biochimiques [118].

Les métaux lourds tels que le Plomb, le Mercure et le Cadmium sont omniprésents dans l'environnement. Leur présence résulte principalement des activités humaines dans les industries minières, sidérurgiques, chimiques et du cuir. Ces activités industrielles entraînent un transfert de métaux lourds dans l'air, le sol et l'eau ; par la suite, les plantes et les animaux accumulent des métaux lourds dans leurs tissus et, dans le cas des mammifères laitiers, dans le lait. Enfin, la consommation de produits issus d'animaux et/ou de plantes contaminés entraîne un risque pour la santé humaine [118].

L'exposition orale aux métaux lourds par ingestion de denrées alimentaires (comme le lait) constitue donc une préoccupation majeure en matière de santé et d'environnement, suscitant un intérêt croissant dans le domaine de la recherche et de la santé publique. Les parties suivantes de ce chapitre vont s'intéresser au profil toxicologique des métaux, tout en insistant sur l'exposition orale à ces métaux.

### II.3. Profil toxicologique du Plomb

Le Plomb, un élément toxique de la famille des cristallogènes, est naturellement présent dans divers environnements, principalement dans l'écorce terrestre et le sol [119]. Grâce à des réglementations strictes, l'utilisation humaine du Plomb a été réduite. Cependant, l'exposition professionnelle peut survenir lors de la fabrication, du stockage et du recyclage des batteries, de l'utilisation de peintures au Plomb, de l'addition de Plomb à l'essence, des opérations d'impression, de la production de condensateurs, de résistances et de semi-conducteurs.

D'un point de vue alimentaire pour la population générale, les aliments les plus susceptibles de contenir des traces de Plomb, par ordre décroissant, sont les légumes et les fruits, le lait et les produits laitiers, les abats, les produits carnés, le vin et les produits de la mer [121-123].

## CHAPITRE II CONTAMINANTS DU LAIT ET PROFILS TOXICOLOGIQUES DES METAUX LOURDS

La Figure 4 illustre les principales informations qui concernent la toxicocinétique du Plomb.

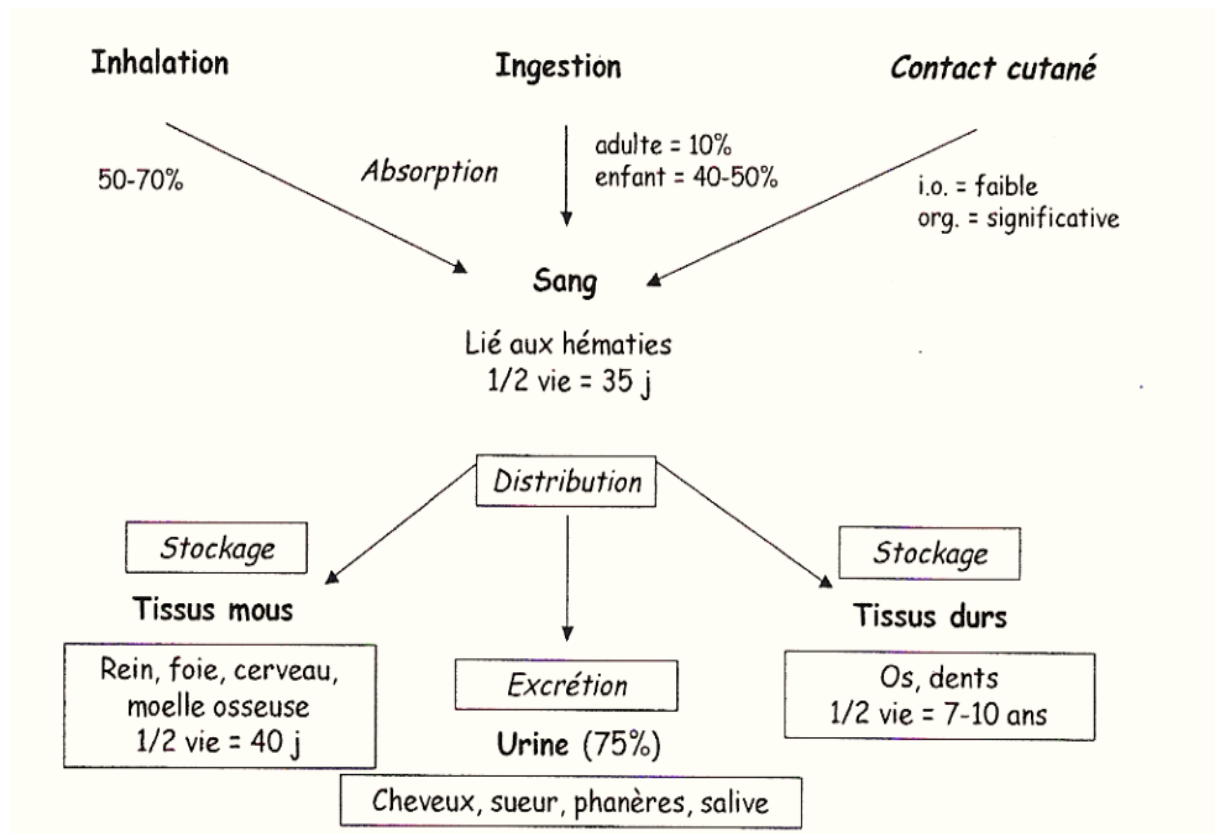


Figure 4. Toxicocinétique du Plomb [117].

La toxicocinétique du Plomb implique son absorption digestive, principalement dans l'intestin grêle, où 5 à 15% du métal ingéré est absorbé chez les adultes, et jusqu'à 42% chez les enfants. Après absorption, le Plomb se répartit rapidement dans divers organes par la circulation sanguine, avec une demi-vie de 30 jours dans les tissus mous et dans le sang, mais pouvant s'étendre de 1 à 10ans dans les os. Les teneurs en Plomb dans le corps humain sont à l'état d'équilibre, réparties entre le sang, les tissus mous et les os [118]. L'élimination se fait principalement par voie urinaire (plus de 75%) et fécale (15-20%), avec une petite excrétion lactée, salivaire et capillaire. Le Plomb non fixé est rapidement éliminé de l'organisme, suivi d'une élimination plus lente de la fraction faiblement liée, et enfin d'une élimination encore plus lente correspondant au Plomb fortement lié, notamment aux os [116].

Le mécanisme d'action toxique du Plomb est lié à son incapacité à assurer les fonctions vitales, interférant ainsi avec divers processus biochimiques, ce qui le rend toxique pour les cellules [116].

## CHAPITRE II CONTAMINANTS DU LAIT ET PROFILS TOXICOLOGIQUES DES METAUX LOURDS

---

La similarité des cations du Plomb «  $Pb^{2+}$  » avec le  $Ca^{2+}$ , le  $Zn^{2+}$  et probablement le  $Mg^{2+}$  est la cause d'interférence avec de nombreux processus biochimiques [123-125]. De ce fait, il interfère avec la pompe ATPase Na-K sur les membranes cellulaires, le métabolisme de la vitamine D, la synthèse de l'hème, certaines enzymes impliquées dans la phosphorylation oxydative et l'absorption et le métabolisme du Calcium [123-125].

Au niveau du système nerveux, le Plomb agit par l'induction du stress oxydatif, l'intensification de l'apoptose et l'interférence avec les enzymes  $Ca^{2+}$  dépendantes. Il interfère également avec les transmissions de signaux dans les cellules nerveuses, y compris les transmissions dopaminergiques et les processus de signalisation au niveau des jonctions post-synaptiques et pré-synaptiques [123-125]. Les risques sont particulièrement élevés pour les nourrissons et les enfants et il a été démontré qu'ils affectent le quotient intellectuel, la capacité d'attention et la réussite scolaire [118].

L'exposition orale et continue à des aliments contenant du Plomb peut être responsable d'une intoxication chronique. L'empoisonnement au Plomb, également connu sous le nom de saturnisme, résulte de l'accumulation progressive de Plomb dans l'organisme due à une exposition répétée. Les effets toxiques touchent divers systèmes, notamment le système nerveux, gastro-intestinal et hématopoïétique, pouvant entraîner des dommages rénaux et hépatiques. De plus, des études indiquent que les composés de Plomb sont potentiellement cancérigènes [123-126].

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a conclu que sur la base des données, le Plomb et ses composés sont classés comme potentiellement cancérigènes en tant que cancérigène du groupe 2A [126].

### II.4. Profil toxicologique du Cadmium

Le Cadmium, un métal lourd avec un numéro atomique de 48, revêt une importance majeure dans le contexte de la toxicologie en raison de ses propriétés chimiques et de ses effets néfastes sur la santé humaine. Partageant des similarités chimiques avec le Zinc, le Cadmium est souvent présent dans les minerais de Zinc ou de Plomb à des concentrations significatives [118,119].

L'exposition au Cadmium, en dehors des environnements professionnels industriels, provient principalement de la consommation alimentaire. Chez les fumeurs, le tabac représente une source d'apport équivalente à celle des aliments. De plus et contrairement au Plomb, le Cadmium présente un risque de contamination significatif des chaînes biologiques terrestres en raison de sa migration aisée du sol vers les plantes [118,127].

## CHAPITRE II CONTAMINANTS DU LAIT ET PROFILS TOXICOLOGIQUES DES METAUX LOURDS

---

Les études d'exposition orale du Cadmium ont révélé que seulement 1 à 6% de la dose était absorbée, par opposition à l'exposition pulmonaire où 10 à 50% des particules inhalées sont déposées dans les parties alvéolaires des poumons [118].

L'une des particularités du Cadmium réside dans son caractère cumulatif. Une fois absorbé, il est principalement stocké dans l'organisme et se lie à une protéine appelée métallothionéine [128,129]. Principalement concentré dans la zone corticale des reins et du foie, il s'accumule dans ces organes qui représentent environ 60% du stock corporel. Son élimination est limitée et essentiellement urinaire, avec une demi-vie estimée entre 10 et 30 ans [128,129].

Au niveau hépatique et rénal, la métallothionéine contribue à limiter la toxicité du Cadmium. Cependant, en cas de saturation, le cadmium se libère ( $Cd^{2+}$ ) et provoque des effets toxiques en perturbant plusieurs mécanismes biologiques, tels que l'interaction avec les enzymes contenant des groupements thiols, l'inhibition de la protéine kinase C, l'altération du métabolisme du calcium et de la vitamine D [118].

La consommation d'aliments contaminés par le Cadmium est associée à des problèmes de santé tels que l'insuffisance rénale chronique. Une exposition chronique peut engendrer des pathologies rénales, respiratoires (emphysème), osseuses (ostéomalacie) et cardiovasculaires (hypertension) [118]. De plus, l'exposition orale et pulmonaire au Cadmium a été liée à une augmentation de la fréquence de certains cancers, notamment des poumons, de la vessie, des seins et de l'endomètre [130].

### II.5. Profil toxicologique du Mercure

L'exposition au Mercure, élément persistant et toxique, est principalement d'origine anthropique, provient du contact avec les combustibles, les minéraux et les gaz d'échappement industriels et automobiles. La consommation d'aliments, notamment de poissons, est la principale source d'exposition au Mercure organique [131,132].

L'absorption, la distribution et le stockage du Mercure dans l'organisme sont influencés par les propriétés physico-chimiques des composés et leur solubilité. L'absorption peut se faire par trois voies : pulmonaire pour les dérivés alkyles volatils (60%), digestive par ingestion d'aliments contaminés par le méthylmercure (MeHg) (95%) et cutanée (10%) [133]. Le MeHg, principalement lié à l'atome de soufre des ligands thiol, pénètre dans les cellules endothéliales de la barrière hémato-encéphalique. L'élimination principale du méthylmercure se fait par les fèces, avec une excrétion urinaire négligeable [131].

Les effets du Mercure sur l'organisme incluent l'altération de la synthèse des protéines, la perturbation de la formation des microtubules, l'altération de la transmission synaptique, des signaux de transduction et la réponse immunitaire [118].

Il accroît aussi la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, induit un stress oxydatif et perturbe l'homéostasie [118]. Les reins sont principalement touchés par le Mercure inorganique, provoquant une tubulopathie et/ou une glomérulopathie réversible [118].

Le méthylmercure engendre une neurotoxicité prononcée avec une symptomatologie caractéristique : troubles sensoriels, ataxie, dysarthrie, diminution du champ visuel, altération auditive et tremblements. L'exposition prénatale, en particulier au méthylmercure, peut entraîner des retards de développement et des altérations cognitives et comportementales chez les enfants [134].

Le Mercure et ses composés inorganiques sont classés par le CIRC dans le groupe 3, signifiant que leur cancérogénicité pour l'homme ne peut être classée, tandis que le méthylmercure est classé dans le groupe 2B, indiquant qu'il pourrait être cancérogène pour l'homme [135].

### II.6. Profil toxicologique du Nickel

Le Nickel (numéro atomique 28), est un élément présent naturellement dans la croûte terrestre, ou il est principalement trouvé dans les minerais de sulfure ou d'oxyde. Du fait de son utilisation, le Nickel et ses composés, se retrouvent dans divers environnements, des bijoux à la technologie aérospatiale, en passant par l'air, l'eau, le sol et même les aliments [118].

Le Nickel est utilisé pour conférer à l'acier inoxydable ses propriétés anti-corrosion et anti-oxydation. Il peut être émis dans l'air par certains procédés industriels et la combustion de charbon et de produits pétroliers. La fumée de cigarette peut contenir jusqu'à 3 mg de Nickel par cigarette [118].

Bien que mal absorbé par le tractus gastro-intestinal, le Nickel est couramment ingéré avec les aliments et l'eau potable. La majeure partie de l'apport en Nickel provient de l'exposition alimentaire et à l'eau, avec une absorption de 1 à 10% par les humains. Le Nickel est excrété principalement dans les fèces, une petite partie dans l'urine et même une fraction par la transpiration. De plus, il peut traverser le placenta [118].

Les effets toxiques du Nickel résultent de son interaction avec divers processus biologiques. Les mécanismes d'action toxique comprennent la réactivité avec les biomolécules, induisant des altérations structurelles et fonctionnelles, un stress oxydatif qui génère des radicaux libres et une réponse inflammatoire [118].

## CHAPITRE II CONTAMINANTS DU LAIT ET PROFILS TOXICOLOGIQUES DES METAUX LOURDS

---

Les conséquences néfastes pour la santé humaine varient en fonction de la durée, de la concentration et de la voie d'exposition [118].

L'exposition au Nickel peut causer des effets nocifs variés :

- Sensibilisation cutanée : en cause de dermatite de contact allergique, le Nickel est un allergène courant. Une exposition répétée sur la peau peut entraîner des réactions inflammatoires, démangeaisons, rougeurs et ampoules [118] ;
- Effets respiratoires : inhaler des particules de Nickel peut entraîner des problèmes respiratoires tels que la toux, l'essoufflement, la bronchite chronique et l'asthme professionnel ;
- Effets rénaux : l'exposition au Nickel peut conduire à une néphropathie tubulo-interstitielle, une diminution de la fonction rénale et un risque accru de calculs rénaux ;
- Effets cancérogènes : des études ont montré que son inhalation peut entraîner des cancers des poumons, de la gorge, de l'estomac, du nez et des sinus [136].



## Chapitre III

### Transfert des métaux lourds vers le lait

## CHAPITRE III TRANSFERT DES METAUX LOURDS VERS LE LAIT

Le lait est une source importante de nutrition, mais il peut également contenir des métaux toxiques tels que le Cadmium, le Plomb, le Mercure, le Nickel, etc. Ces métaux peuvent provenir de diverses sources (naturelles ou anthropiques), y compris de l'alimentation animale, des sols contaminés, de l'eau d'abreuvement et l'environnement [137,138]. Comprendre le mécanisme de transfert des métaux lourds des matrices environnementales vers l'animal puis vers le lait est essentiel et sera abordé dans ce chapitre.

### III.1. Rôle des matrices environnementales dans la contamination du lait

Une fois introduits dans l'écosystème, les métaux lourds se dispersent à travers tous les compartiments de la biosphère, incluant l'air, l'eau, le sol et les végétaux [139]. Plusieurs interactions directes et indirectes existent entre les différentes matrices de la chaîne trophique impliquant le sol, l'alimentation animale, et finalement le lait, comme illustré dans la Figure 5.

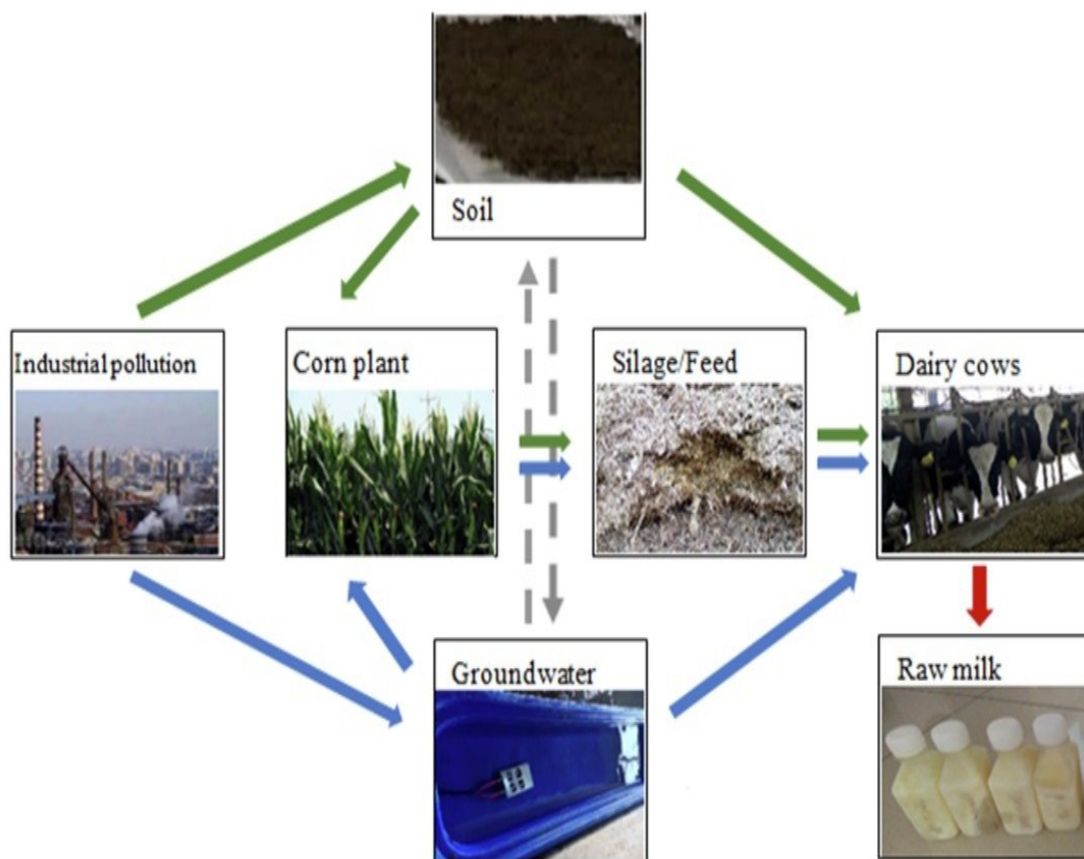


Figure 5. Mécanismes de transfert des métaux lourds dans la chaîne alimentaire [141].

## **CHAPITRE III TRANSFERT DES METAUX LOURDS VERS LE LAIT**

---

Les métaux lourds sont des constituants naturels de la croûte terrestre, émis par l'activité volcanique, les incendies de forêt et l'altération des roches [139]. Cependant, les sources anthropiques dépassent largement les sources naturelles et comprennent diverses industries de transformation et de fabrication, l'exploitation minière, les fonderies, la tuyauterie, l'élimination des déchets, la combustion d'énergies fossiles et de sous-produits, la corrosion, etc. [139].

Après émission des métaux par les sources de pollution, le sol est un vecteur important de contamination de la chaîne alimentaire par transfert des métaux vers les eaux, les plantes et les animaux (par ingestion du sol lors du broutage) [142].

La teneur des métaux dans le sol dépend de la distance de la source de pollution et de la zone de prélèvement [143]. Ainsi, Simsek et al., (2000) ont montré que les teneurs en Plomb sont supérieures en zones industrielles et routières par rapport aux zones rurales [144]. La distribution des métaux dans le sol dépend de leurs propriétés physico-chimiques ; si le métal est soluble, il contamine les nappes phréatiques et/ou les plantes, s'il est insoluble, il ne contamine que le sol [145,146].

Après contamination du sol, les métaux peuvent contaminer les eaux à cause de l'affouillement du sol par les pluies, ou être transférés aux plantes. Le transfert des métaux lourds du sol aux plantes est une étape importante dans l'accumulation des éléments toxiques le long de la chaîne alimentaire. Les métaux sont absorbés par les racines, puis transportés vers les parties supérieures de la plante telles que les feuilles, les tiges et les fruits. Le transfert des métaux vers les plantes dépend de la barrière « sol-plante » qui s'altère quand la concentration de métal dépasse les limites critiques, spécialement pour les métaux toxiques comme le Plomb et le Cadmium [148].

Il existe de nombreux facteurs qui influencent l'accumulation des métaux dans la plante, comme le stade de croissance, le pH et la concentration des éléments dans le sol [149]. En conséquence, les plantes qui se développent sur un sol contaminé peuvent être des sources importantes en éléments toxiques dans la chaîne alimentaire [150].

L'accumulation des éléments toxiques pour le bétail par consommation de plantes contaminées est un risque réel. Des auteurs ont observé une accumulation de Plomb, de Cadmium, de Cu et de Zn chez les animaux pâturant dans des zones contaminées [137]. Lorsque les animaux mangent ces parties, les métaux sont ingérés et absorbés dans leurs organismes. Les métaux peuvent ensuite s'accumuler dans les tissus de l'animal, notamment dans les muscles, le foie et le rein ou être sécrétés dans le lait et être transférés à d'autres animaux ou à l'homme si les produits alimentaires sont consommés par ces derniers [147].

Dans le contexte spécifique des dromadaires, qui coupent les herbes avec leurs dents, l'ingestion de sol est limitée. Cependant, une étude a montré que des quantités significatives de sols ont parfois été retrouvées dans les estomacs des chameaux pendant des interventions chirurgicales [147].

Suite à l'ingestion et à l'absorption des métaux présents dans les milieux aquatiques, les sols et les végétaux par les animaux, le transfert conduit à l'accumulation de ces métaux dans l'organisme animale ou à leurs sécrétions dans le lait [141]. L'étude de Dey et Swarup (1996) a établi une corrélation entre les niveaux de Plomb dans le lait du bétail et ceux présents dans leur alimentation, avec des concentrations élevées de Plomb détectées dans le lait de vaches pâturant le long des routes à fort trafic.

Les cas d'excès en métaux chez les dromadaires sont rares, avec peu de références dans la littérature et des normes peu définies pour cet animal et ses produits. La littérature montre que le dromadaire possède la capacité d'augmenter l'absorption des minéraux en période de rareté (par exemple pour le Cuivre, le Manganèse et le Fer), une faculté de stockage accrue pour anticiper les périodes de carence (Se), une certaine tolérance à l'excès de minéraux en augmentant l'excrétion et enfin le maintien des activités enzymatiques en cas de carence (en particulier pour le Cuivre et le Sélénium) [152].

### **III.2. Mécanisme de transport lactationnel des métaux lourds**

Après absorption des métaux, ces derniers peuvent être transportés le long de l'organisme pour être sécrétés au niveau du lait. Les connaissances concernant le transport lactationnel des métaux sont rares. Le transport des métaux dans le lait est supposé suivre les mêmes voies que les composants du lait, selon les principes de captation cellulaire des métaux (Tableau 2) [153]. En général, il y a un faible transfert de métaux toxiques vers le lait lorsque les niveaux d'exposition sont faibles [153].

Dans le lait et contrairement aux produits lipophiles, tels les polluants organiques persistants, les métaux ne se lient pas aux graisses et ne s'accumulent généralement pas à des concentrations plus élevées que le sang. Cependant, chaque métal se répartit de manière caractéristique entre les fractions du lait [154,155]. Le Plomb se trouve presque exclusivement dans la fraction de la caséine, tandis que le Cadmium et le MeHg se trouvent dans les graisses et le Mercure inorganique se trouve dans les fractions de lactosérum [155]. De plus, le Cadmium et le Plomb sont également répartis entre les composants du lait à haut et à bas poids moléculaire [156].

**Tableau 2. Captation cellulaire des métaux lourds [153].**

<b>Transport passif</b>	<b>Transport actif</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Diffusion médiée par des canaux</li><li>- Diffusion médiée par des transporteurs (par exemple, <math>\text{Ca}^{2+}</math>)</li><li>- Diffusion simple</li><li>- Filtration</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Transport dépendant de l'ATP via des protéines transporteurs (par exemple, <math>\text{Na}^+</math>, <math>\text{K}^+</math>, <math>\text{Ca}^{2+}</math>)</li></ul>
<b>Le transport dépend de :</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- La similarité des métaux toxiques avec les métaux essentiels (par exemple, Ca-Pb, Zn-Cd) (mimétisme chimique)</li><li>- Taille et poids moléculaire</li><li>- Caractère lipophile</li><li>- Grade d'ionisation</li></ul>	
<b>Le transport à travers les cellules épithéliales peut se produire de deux manières :</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- Transcellulaire (actif ou passif)</li><li>- Paracellulaire (passif à travers les jonctions serrées des cellules épithéliales)</li></ul>	

Selon Hallen et al., (1996), le Plomb est transporté vers le lait par la même voie que le Calcium en raison de sa forte affinité avec la caséine. 60 à 80% du Plomb est lié à la caséine dans le lait maternel humain, mais le lait maternel a une très faible teneur en caséine, donc le taux d'excrétion du Plomb est faible [157].

De leur côté, Sundberg et al., (1999) ont montré que l'albumine sérique est une protéine de liaison majeure dans les fractions de lactosérum, à la fois pour le MeHg et le Mercure inorganique. Les auteurs ont suggéré un transfert passif du plasma vers le lait en utilisant l'albumine comme transporteur passif [158].

Le Cadmium n'est pas transporté efficacement vers le lait. Après son absorption, la majorité du Cadmium est stocké au niveau rénal, qui est un site majeur de synthèse des métallothionéines et par conséquent d'accumulation. Ce phénomène peut expliquer les faibles taux du Cadmium retrouvés dans le lait par rapport au Plomb [159]. Le Cadmium dans le cytosol mammaire est principalement présent dans la fraction métallothionéine. La métallothionéine mammaire peut soit être synthétisée dans les cellules mammaires, soit provenir d'autres tissus, comme le foie, et est transportée par le plasma vers la glande mammaire [159].

Su et al., (2017) ont étudié les concentrations du Cadmium dans le sang et le lait de vaches Holstein après une exposition orale de  $182\mu\text{g}/\text{Kg}/\text{jour}$  de Cadmium pendant 21 jours. Les résultats ont indiqué que le Cadmium s'est accumulé dans les tissus des vaches et a été excrété dans le lait [160]. Cependant, Sharma et al., (1979) dans une autre expérience, ont constaté qu'une alimentation quotidienne de  $11300\mu\text{g}/\text{Kg}$  de Cadmium ne provoquait pas d'accumulation dans le lait. Les auteurs ont par ailleurs signalé une accumulation significative dans le foie et les reins des animaux exposés [161].

### **III.3. Facteurs influant sur la teneur en métaux du lait**

#### **III.3.1. Métabolisme animal**

Différentes espèces animales ont des mécanismes de métabolisme et d'excrétion différents, ce qui peut influencer la quantité de métaux lourds transférés dans le lait. Par exemple, les ruminants ont une capacité de détoxification plus élevée grâce à leur système ruminal, ce qui peut réduire la quantité de métaux lourds absorbés et transférés dans le lait par rapport à d'autres espèces [137].

#### **III.3.2. Niveau d'exposition**

Les animaux nourris avec des aliments contenant des niveaux élevés de métaux lourds ou ceux qui pâturent dans des zones fortement contaminées auront une probabilité plus élevée d'accumuler des métaux lourds dans leur organisme, ce qui peut ensuite être transféré dans le lait. La qualité de l'eau de boisson est également importante, car une eau contaminée peut contribuer à l'exposition des animaux aux métaux lourds [150].

#### **III.3.3. Durée de l'exposition**

La durée de l'exposition des animaux aux métaux lourds peut influencer la quantité de métaux lourds transférés dans le lait. Une exposition à court terme peut entraîner une accumulation moindre de métaux lourds dans le lait, tandis qu'une exposition à long terme peut augmenter la concentration de ces métaux dans le lait [153].

#### **III.3.4. Phase de lactation**

Des études ont montré que la concentration de certains métaux lourds, tels que le Plomb et le Cadmium, peut-être plus élevée au début de la lactation, tandis que d'autres métaux comme le Mercure peuvent atteindre leur concentration maximale à la fin de la lactation.

### III.3.5. Gestion alimentaire

La composition de l'alimentation animale peut influencer le transfert des métaux lourds dans le lait. Par exemple, l'ajout de certains additifs alimentaires ou la consommation d'aliments riches en fibres peuvent affecter l'absorption et l'excrétion des métaux lourds chez les animaux.

### III.4. Transfert, accumulation et excrétion des métaux toxiques après ingestion alimentaire dans l'organisme animal

Sur la base des résultats signalés par plusieurs chercheurs, les voies métaboliques potentielles des métaux toxiques chez les dromadaires sont présentées dans la Figure 6. Les métaux peuvent pénétrer dans l'organisme animal par l'ingestion d'eau et d'aliments, voire le sol de la ferme ; ils sont ensuite absorbés dans l'intestin. Le sang transporte les ions vers d'autres organes tels que le foie, le rein et l'os, où les ions s'accumulent. La partie des ions qui n'est pas accumulée dans les organes sera excrétée dans les fèces, l'urine et même le lait pour les chamelles en lactation. La portion accumulée dans le foie, le rein et l'os peut être libérée à nouveau. Les états physiologiques (grossesse, accouchement, ostéoporose, infection ou immobilisation prolongée) associés à une augmentation de la résorption osseuse favorisent la libération du Plomb et son entrée dans le sang et le lait [150-155].

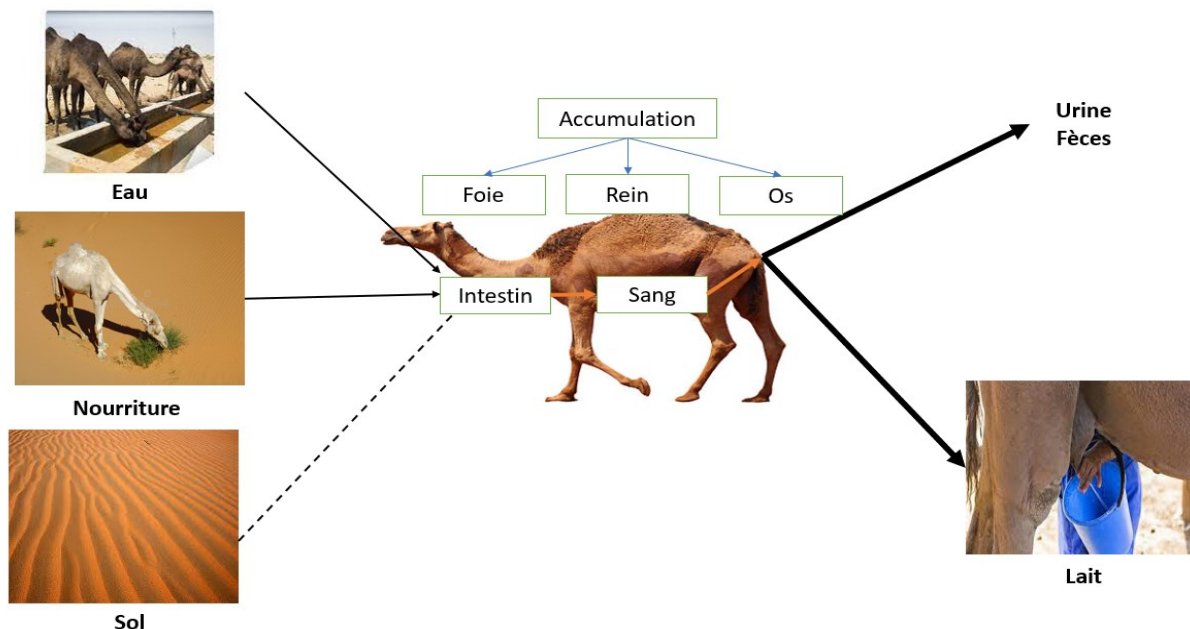


Figure 6. Résumé du transfert, de l'accumulation et de l'excrétion des métaux toxiques après ingestion alimentaire, adapté et modifié de Zhou et al, (2019) [141].

## Chapitre IV

Revue systématique sur la  
présence des métaux dans le  
lait de chamelle



## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

---

Le lait de chamelle était pendant longtemps uniquement consommé par les éleveurs des camélidés et était considéré comme un produit marginalisé [11,51]. Durant ces dernières années, le développement du marché du lait de chamelle au niveau mondial a été important grâce à l'approfondissement de la connaissance de sa composition et de ses bienfaits [162]. Ainsi, malgré sa similarité avec le lait d'autres espèces, en termes de composition (matières grasses, protéines, lactose et minéraux), le lait de chamelle présente de nombreuses spécificités comme la présence d'acides gras à chaîne moyenne et une richesse en vitamine C et en Fer [53]. De plus, le lait de chamelle est considéré comme un substitut sûr pour la plupart des enfants présentant des symptômes d'intolérance au lactose et lait de vache [14,15]. Il est doté d'un effet hypoglycémiant [163], antimicrobien [164] et d'un potentiel sur l'autisme [66].

Le risque d'exposition aux métaux lourds par l'exposition alimentaire est une préoccupation majeure dans la plupart des pays du monde en raison du danger considérable pour la santé humaine [165,166]. Plusieurs métaux toxiques, tels que le Plomb et le Cadmium, ont été reportés dans le lait de vaches à travers le monde. Ces métaux proviennent principalement de l'environnement pollué où se trouvent les animaux [167,168]. Les niveaux de métaux lourds dans le lait varient selon les pays, avec quelques éléments montrant des concentrations plus élevées dans les pays en développement que dans les pays développés [137,138].

La toxicité des métaux dépend d'un certain nombre de facteurs dont les plus critiques sont la voie d'entrée dans le corps, l'âge et le sexe de la personne exposée, le niveau d'absorption, et l'état du métal [169]. Les nourrissons, les enfants et les personnes âgées sont décrits comme particulièrement vulnérables aux risques d'exposition [170]. Les métaux toxiques ont un accès facile à la chaîne alimentaire [171] et ont été signalés pour exercer de nombreuses fonctions pathologiques dans le corps humain [172]. Une fois absorbés, ils s'accumulent dans le corps pendant toute la durée de vie et peuvent affecter négativement un certain nombre de processus métaboliques [173].

Plusieurs revues systématiques de la littérature se sont intéressées à la présence des métaux lourds dans le lait de vache indiquant un risque potentiel pour la santé des consommateurs de lait [174,175].

Ces études ont surtout montré que le Plomb présent dans le lait dépasse souvent la limite réglementaire fixée à 20µg/Kg, établie par la commission mixte de la FAO/OMS et l'Union Européenne [176,177].

## **CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE**

---

Cependant, les données concernant l'investigation des métaux lourds dans le lait de chamelle sont dispersées. Par conséquent, nous avons effectué un examen systématique à l'échelle mondiale des niveaux de métaux lourds dans le lait de chamelle.

La revue systématique est considérée comme une méthode pour résumer et synthétiser les résultats obtenus à partir d'un grand nombre d'études liées à la même question de recherche et permet d'obtenir des résultats plus précis [178]. Cette méthode a été largement appliquée dans le domaine de la sécurité alimentaire, en particulier pour estimer la concentration globale de contaminants tels que les métaux lourds ou les aflatoxines dans les aliments afin d'évaluer les risques pour la santé publique ou les besoins de surveillance [179-181].

Notre revue vise donc à :

- 1- Evaluer les niveaux de métaux lourds (Pb, Cd, Hg et Ni) dans le lait de chamelle et les risques sanitaires associés ;
- 2- Discuter des sources potentielles de métaux lourds dans le lait, en mettant l'accent sur les sources environnementales ;
- 3- Evaluer les risques non cancérigènes et cancérigènes du Plomb et du Cadmium pour les adultes et les enfants par le biais d'une discussion approfondie.

### **IV.1. Matériel et méthodes**

#### **IV.1.1. Recherche de la littérature**

Afin d'obtenir toutes les publications concernant les concentrations de métaux lourds dans le lait de chamelle à travers le monde, une recherche systématique a été effectuée dans les bases de données internationales (Scopus, PubMed et Google Scholar) en se focalisant sur les articles ayant été publiés durant la période allant de Janvier 2000 à Mars 2023.

La recherche a été faite en utilisant les mots-clés « Heavy metals », « Camel milk » combinés avec l'opérateur booléen AND. La recherche documentaire et l'obtention d'articles ont été effectuées conformément aux lignes directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis) (Figure 7)[175]. Les articles en double ont été supprimés et les résumés des articles restants ont été lus pour une étude plus approfondie afin de vérifier leur éligibilité. Ensuite, les informations essentielles ont été extraites des articles sélectionnés et consignées dans une feuille de calcul Excel.

Le logiciel EndNote X20 (Thomson ResearchSoft, Philadelphie, PA) a été utilisé pour importer toutes les citations retrouvées.

## **CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE**

---

### **IV.1.2. Critères de sélection, d'inclusion et d'exclusion**

Les critères d'inclusion dans notre étude étaient :

- 1- La disponibilité du texte intégral ;
- 2- La quantification des métaux lourds (Pb, Cd, Hg et Ni) dans le lait de chamelle ;
- 3- Tout travail original en excluant les revues de la littérature ;
- 4- Date de publication entre janvier 2000 et mars 2023 ;
- 5- De plus, seuls les articles publiés en langue anglaise et française ont été évalués pour limiter les erreurs personnelles dans la procédure de traduction et d'interprétation.

Les articles ne répondant pas à ces critères ont été exclus. Les critères d'exclusion suivants ont été adoptés :

1. Le lait d'autres espèces telles que le lait de chèvre, de vache et de brebis ;
2. Le lait transformé, qui désigne le lait cru ayant subi plusieurs étapes par divers procédés tels que l'homogénéisation, la stérilisation ou la pasteurisation, etc. ;
3. Les études sur les aflatoxines, les antibiotiques, les pesticides ou la contamination microbienne du lait ;
4. Les études sur les métaux dans d'autres matrices que le lait (sang, urine, etc.) ;
5. Les résumés de congrès ou de conférence ou lettres à l'éditeur.

### **IV.1.3. Extraction des données**

Les articles sélectionnés ont fait l'objet d'un examen approfondi pour être extrait. Les données de chaque article comprenaient le premier auteur, l'année d'étude, les régions géographiques, la taille de l'échantillon, la moyenne des niveaux des métaux, l'écart type et les méthodes de détection.

# CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

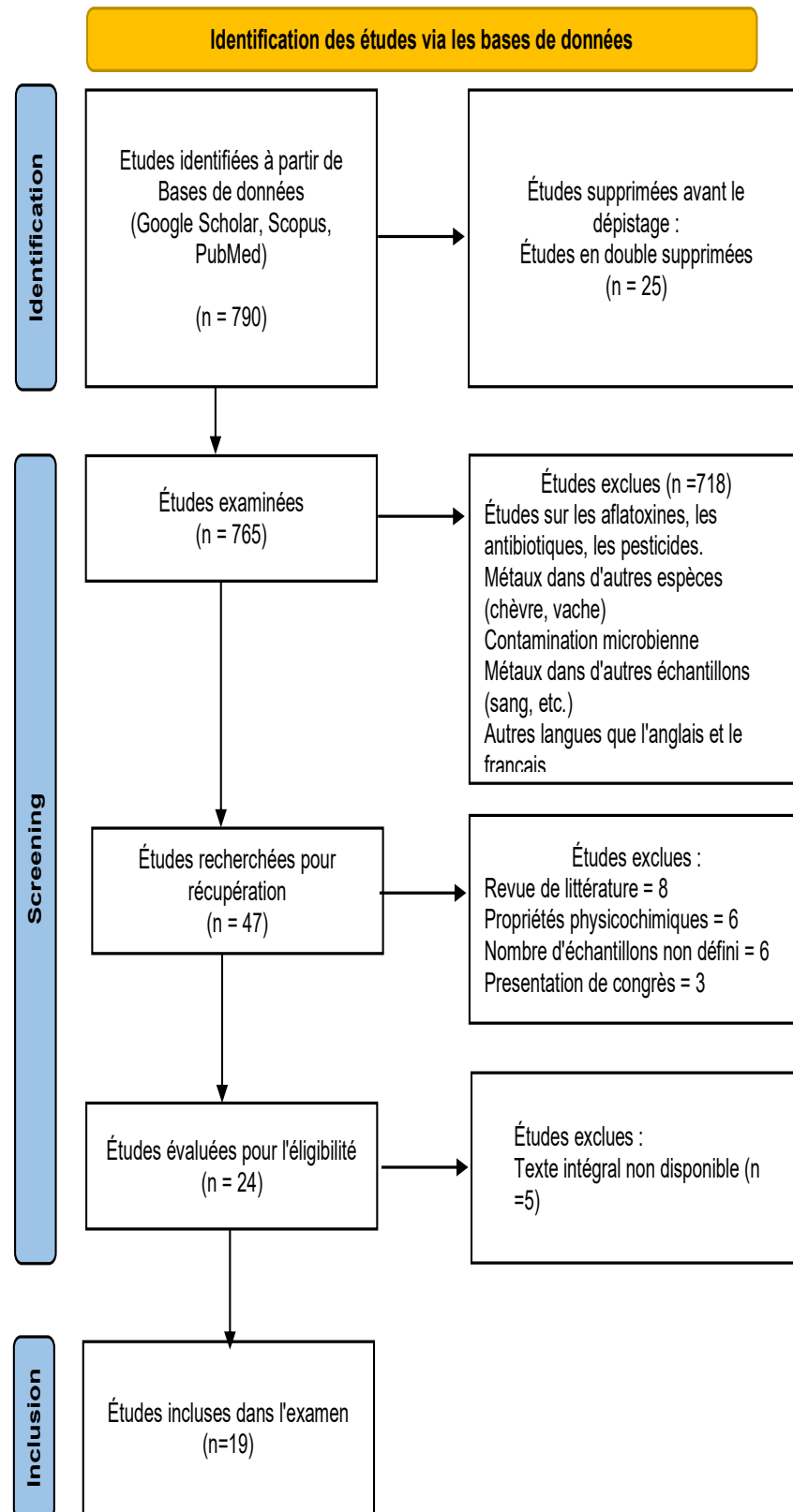


Figure 7. Organigramme du processus de sélection des études, conformément aux lignes directrices PRISMA.

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

---

### IV.1.4. Évaluation probabiliste des risques pour la santé

#### A. Estimation de l'apport quotidien

L'évaluation du risque sanitaire non cancérigène lié à l'exposition au Plomb, Cadmium, Nickel et Mercure par la consommation de lait de chamelle a été réalisée selon la méthode US-EPA (United States- Environmental Protection Agency) qui considère le quotient de danger (HQ) comme le rapport de la dose estimée d'un contaminant à une dose de référence [182].

L'évaluation du risque sanitaire a été déterminée en estimant les doses d'exposition aux métaux dues à la consommation de lait, en termes de dose journalière estimée (EDI) en suivant l'équation :

$$EDI = \frac{C \times IR}{BW} \quad (\text{Équation 1})$$

L'EDI est la dose journalière d'exposition ( $\mu\text{g}/\text{Kg}/\text{j}$ ) ; IR est la quantité supposée ingérée de lait. La quantité est 300 pour les adultes et 500 pour les enfants (ml/jour) ; BW est le poids corporel (Kg) supposé de 70Kg pour les adultes et de 30Kg pour les enfants ; et C est la concentration moyenne du métal dans le lait ( $\mu\text{g}/\text{Kg}$ ).

L'EDI des métaux lourds (Pb, Cd, Hg) a été comparée à la dose journalière tolérable provisoire fixée par le Comité mixte FAO/OMS d'experts des additifs alimentaires [183]. Tandis que l'apport quotidien en Nickel a été comparé aux valeurs des apports nutritionnels recommandés établies par le Food and Nutrition Board de l'Institute of Medicine [184].

#### B. Estimation du quotient de risque non cancérigène

Le HQ est défini comme le rapport de la dose estimée d'un contaminant à la dose de référence, selon l'équation 2 :

$$HQ = \frac{EDI}{RfD} \quad (\text{Équation 2})$$

La dose de référence (RfD) est l'estimation de l'exposition quotidienne qui devrait être sans risque significatif d'effets indésirables au cours de la vie. Sa valeur pour le Cadmium, Plomb, Mercure et Nickel est respectivement de 0,001, 0,0035, 0,0003 et 0,02mg/Kg /jour [174].

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

---

Une valeur HQ inférieure à 1 indique que l'exposition quotidienne au métal par la consommation de lait est peu susceptible de provoquer des effets non cancérigènes, tandis qu'une valeur supérieure à 1 montre que pour la population exposée, des risques chroniques pour la santé peuvent survenir [172].

### C. Estimation du Risque Cancérigène

La probabilité qu'un individu développe un cancer au cours de sa vie d'exposition à la consommation de lait contaminé a été estimée à l'aide du risque cancérigène (RC). Le RC a été calculé pour le Plomb et le Cadmium selon l'équation 03 :

$$RC = \frac{Cm \times EF \times ED \times FIR \times 0.001}{TA \times BW} \times CSF \text{ (Équation 3)}$$

Où EF est la fréquence d'exposition (350 jours/an), ED est la durée d'exposition (52 ans pour les adultes et 18 ans pour les enfants) équivalente à une durée de vie moyenne en consommant du lait, FIR est le taux d'ingestion alimentaire considéré (300ml/j pour les adultes et 500ml/j pour les enfants), Cm est la concentration en métaux dans le lait (mg/Kg), BW est le poids corporel moyen (70Kg pour les adultes, 30Kg pour les enfants) et TA est le temps d'exposition moyen aux métaux non cancérigènes (25550 jours)[186].

CSF est le facteur de pente cancérigène, qui estime la probabilité maximale qu'un individu développe un cancer à la suite d'une exposition à vie à un niveau particulier d'un cancérigène potentiel par voie d'ingestion (Cd : 15 et Pb : 0,0085) [186]. Un RC de  $10^{-6}$ , indique une probabilité de 1 sur 1000000 individus de développer un cancer, qui est considéré comme valeur seuil [187].

## IV.2. Résultats de la revue systématique

### IV.2.1. Caractéristiques de l'étude

Après un examen initial de 790 articles, 25 ont été supprimés en tant que doublons et 765 articles ont eu droit à un examen plus approfondi. Les 718 articles qui ne répondaient pas aux critères d'inclusion ont été exclus. Il convient de noter que les articles qui ne précisaient pas le nombre d'échantillons ont été également exclus.

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

Après évaluation de l'éligibilité, 19 articles contenant 642 échantillons de lait de chamelle, publiés entre 2008 à 2022 (selon nos critères d'inclusion et de non inclusion, aucun article entre 2000 et 2008 n'a été inclus), ont été inclus dans notre étude pour l'évaluation probabiliste des risques pour la santé.

Les principales informations des articles sélectionnés sont présentées dans le Tableau 3 et le Tableau 4. Les 19 études sélectionnées sont issues de 8 pays uniquement [Algérie (2), Kazakhstan (5), Libye (2), Iran (2), Pakistan (3), Arabie Saoudite (2), Egypte (2) et Chine (1)] (Figure 8). Ceci peut être expliqué par le fait que les camélidés vivent principalement dans des régions spécifiques du globe.



**Figure 8. Carte de localisation des études sur le lait cru de chamelle dans différents pays du monde pour mesurer les niveaux de métaux lourds entre 2000 et 2023.**

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

**Tableau 3. Caractéristiques des articles de recherche inclus sur les niveaux de métaux dans le lait de chamelle.**

Auteur (année)	Références	Lieu d'échantillonnage	Taille de l'échantillon	Méthode
Amin et al., (2008)	[188]	Alexandria, Egypte	25	AAS
Meldebekova et al., (2008)	[189]	Almaty, Atyrau, Kyzylorda, Zhambyl, Kazakhstan	8	ICP-AES
Diacono et al., (2008)	[190]	Almaty, Atyrau, Kyzylorda, Zhambyl, Kazakhstan	8	ICP-AES
Konuspayeva et al., (2008)	[191]	Almaty, Atyrau, Kyzylorda, Zhambyl, Kazakhstan	63	ICP-AES
Konuspayeva et al., (2010)	[139]	Almaty, Atyrau, Kyzylorda, Zhambyl, Kazakhstan	24	ICP-AES
Akhmetsadykova., (2011)	[168]	Almaty, Atyrau, Kyzylorda, Zhambyl, Kazakhstan	24	ICP-AES
Elbagermi et al., (2014)	[192]	Misurata, Libye	8	ICP-AES
Abushaala et al., (2014)	[193]	Alkhorjah and Saso valleys, Libya	8	ICP-AES
Damarany., (2015)	[194]	Aswan, Egypte	120	AAS
Soltan et al., (2016)	[195]	Qassim, Riyadh, Arabie Saoudite	5	AAS
Mostafidi et al., (2016)	[196]	Qazvin, Golestan, Semnan, Sistan-Baluchestan, Khuzestan, Bushehr and Tehran, Iran	25	ICP-OES
Ahmed et al., (2017)	[197]	Karak, Pakistan	8	AAS
Parsaei et al., (2017)	[198]	Isfahan, Iran	150	GFAAS
Chen et al., (2019)	[199]	Xinjiang, Chine	50	ICP-MS
Shar et al., (2021)	[200]	Hyderabad, Pakistan	9	AAS
Bougrinat., (2021)	[201]	Touggourt, Algérie	9	GFAAS
Bahri et al., (2021)	[202]	Touggourt, Algérie	8	GFAAS
Ajarem et al., (2022)	[203]	Al-Jubail, Urayarah, Rodaht Khoraim, Arabie Saoudite	30	ICP-MS
Kamal et al., (2022)	[204]	Punjab, Pakistan	60	AAS

\*ICP-AES: Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry; GFAAS: Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry; ICP-MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; AAS: Atomic Absorption Spectroscopy; ICP-OES: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer.



## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

**Tableau 4. Concentration des métaux (Hg, Pb, Cd et Ni) dans le lait de chamelle µg/Kg.**

Auteur (année)	Taille de l'échantillon	Hg	Pb	Cd	Ni
Amin et al., (2008)	25	–	1354±1639	16±27	16109±3358
Meldebekova et al., (2008)	8	–	25±19	–	–
Diacono et al., (2008)	8	–	25±2	–	–
Konuspayeva et al., (2008)	63	–	25±19	–	–
Konuspayeva et al., (2010)	24	–	30±20	2±1	–
Akhmetsadykova., (2011)	24	–	20±20	2±1	–
Elbagermi et al., (2014)	8	–	25±19	91±5	–
Abushaala et al., (2014)	8	–	30±10	40±10	–
Damarany., (2015)	120	–	1560±850	8±1	–
Soltan et al., (2016)	5	–	590	26	2100
	5	–	540	13	1510
Mostafidi et al., (2016)	25	–	4,46±0,65	0,30±0,05	0,53±0,02
Ahmed et al., (2017)	8	–	ND	102 ± 7	220 ± 1
Parsaei et al., (2017)	150	2,36±0,21	3,14±0,26	1,22±0,11	–
Chen et al., (2019)	50	–	18,2±7,1	0,786±1,191	131±148
Shar et al., (2021)	9	–	3,0±0,2	1,3±0,1	–
Bougrinat., (2021)	9	–	–	2,89±1,8	–
Bahri et al., (2021)	8	–	12,11±4,89	–	–
Ajarem et al., (2022)	5	–	750	500	1200
	5	–	400	200	950
	5	–	250	100	900
Kamal et al., (2022)	60	–	–	21±1	–

ND : Inferieur à la limite de détection.

### IV.2.2. Concentration des métaux dans le lait de chamelle

#### A. Plomb dans le lait de chamelle

Dans la présente revue, nous avons pu extraire 17 études qui ont analysé les concentrations de Plomb dans les échantillons de lait cru de chamelle. 46% des études (n=7) ont utilisé la technique de spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES) et la spectrométrie d'absorption atomique (AAS) (7 études).

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

---

Les autres études comprenaient l'utilisation du spectrophotomètre de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) (2 études) et la spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES) (1 étude).

Les niveaux de Plomb dans le lait de chameilles ont varié considérablement d'un endroit à l'autre. La concentration la plus élevée a été retrouvée au niveau d'Aswan, Egypte avec un niveau moyen de  $1560 \pm 850 \mu\text{g/Kg}$ . Cette zone se situait près des industries, pouvant ainsi expliquer ce résultat élevé [194]. De la même manière, un niveau élevé de Plomb a été enregistré ( $250-750 \mu\text{g/Kg}$ ) dans le lait prélevé sur des animaux proches des puits de pétrole en Arabie Saoudite [195,203]. Tandis que les niveaux les plus bas ont été observés dans les régions de Karak, Pakistan (concentration inférieure à la limite de détection) [196]. Au Kazakhstan, cinq études différentes ont rapporté des niveaux proches de la valeur limite de l'OMS avec une concentration d'environ  $30 \mu\text{g/Kg}$  [139,168,190,191]. Sur les 17 études qui se sont intéressées au niveau du Plomb dans le lait, 11 études (64%) ont dépassé la limite maximale réglementaire de résidus de Plomb pour le lait ( $0,02 \text{ mg/Kg}$ ).

### B. Cadmium dans le lait de chamelle

Le second métal le plus étudié derrière le Plomb est le Cadmium avec 15 études sur les 19 incluses. Quatre études ont utilisé l'ICP-AES pour quantifier la concentration de Cadmium dans le lait, tandis que sept ont utilisé l'AAS. Les trois études restantes ont été réalisées par l'ICP-OES, l'ICP-MS. Dans huit études [188,192-195,197,201,203,204], les concentrations de Cadmium dans le lait de chamelle dépassaient les limites de la Fédération internationale de laiterie ( $2,6 \mu\text{g/Kg}$ ).

La teneur en Cadmium dans le lait d'Arabie Saoudite était la plus élevée ( $100-500 \mu\text{g/Kg}$ ) [204], où la concentration de Cadmium était plus de 100 fois supérieure à la limite. Dans une autre étude de Ahmed et al., (2017), des concentrations excessives de Cadmium ( $102 \pm 7 \mu\text{g/Kg}$ ) ont également été trouvées dans le lait du Pakistan [197]. Cependant d'autres études en Iran ont signalé des concentrations relativement faibles de Cadmium dans des échantillons de lait prélevés de plusieurs provinces en 2016 et 2017 [196,198]. Pour finir, la concentration de Cadmium dans le lait en Chine était la plus faible des études incluses avec une valeur de  $0,786 \pm 1,191 \mu\text{g/Kg}$  [199].

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

---

### C. Nickel dans le lait de chamelle

Les données concernant le Nickel ont été extraites de six études menées dans cinq pays différents. Deux études ont été réalisées par ICP-MS, trois par SAA et la dernière par ICP-OES. Dans ces études, la teneur en Nickel du lait de chamelle a dépassé l'apport quotidien alimentaire (0,3 à 1mg/l) recommandé par le Food and Nutrition Board des États-Unis dans trois études [188,195,203].

Une très grande hétérogénéité a été observée. La concentration la plus élevée de Nickel dans les échantillons de lait de chamelle ( $16109 \pm 3358 \mu\text{g/Kg}$ ) figure dans la même étude ou la concentration maximale du Plomb a été observée [188]. Une autre étude a analysé le Nickel dans le lait à plusieurs endroits en Arabie saoudite, avec des niveaux relativement élevés (900-1200 $\mu\text{g/Kg}$ ) [203]. Cependant, des concentrations de Nickel très faibles ( $0,53 \pm 0,02 \mu\text{g/Kg}$ ) ont été détectées dans les échantillons d'Iran par Mostafidi et al., (2016).

### D. Mercure dans le lait de chamelle

Seulement une seule étude s'est intéressée à la concentration du Mercure dans le lait de chamelle. Cette étude a été réalisée par Parsaei et al., (2019) en Iran et qui a reporté une concentration de  $2,36 \pm 0,21 \mu\text{g/Kg}$  en utilisant la SAA [198].

### E. Quotient de danger

Le risque non cancérigène du Plomb, Cadmium, Mercure et Nickel pour les consommateurs de lait a été déterminé en calculant la valeur HQ sur la base des niveaux moyens des métaux mentionnés pour les enfants et les adultes (Tableau 5, Tableau 6).

Les HQ pour tous les éléments analysés suggéraient généralement un risque non cancérigène négligeable. Cependant, les enfants présentaient un risque sanitaire plus élevé que les adultes pour tous les métaux.

Pour le Plomb, les résultats ont indiqué que les consommateurs de lait de chamelle dans deux études sur 17 ont été exposés à un risque important pour la santé. Ces valeurs élevées ont été signalées en Egypte et estimées à 1,36 et 1,18 pour les adultes et 1,589 et 1,831 pour les enfants, respectivement [188,194]. Pour l'étude d'Ahmed et al., (2017), la valeur HQ du Plomb n'a pas pu être calculée, car la concentration du métal dans le lait était inférieure à la limite de détection [197]. Le HQ du Cadmium était supérieur à 1 dans une seule étude avec une valeur de 1,52 qui a été enregistrée dans le lait cru de chamelle en Arabie Saoudite [203].

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

La valeur de HQ du Nickel dépassait 1 dans une seule étude également. Cette valeur était de 2,46 et correspondait au lait cru de la région d'Aswan en Egypte [188].

Le seul résultat lié à l'exposition au Mercure via la consommation de lait indique que le lait collecté dans cette étude était sans danger pour la consommation humaine (HQ <1) [198].

**Tableau 5. Quotient de danger (HQ) pour les éléments toxiques (Hg, Pb, Cd et Ni) dans le lait de chamelle pour les adultes.**

Auteur (année)	Reference	Pb	Cd	Ni	Hg
Amin et al., (2008)	[188]	1,181	0,049	2,458	–
Meldebekova et al., (2008)	[189]	0,022	–	–	–
Diacono et al., (2008)	[190]	0,022	–	–	–
Konuspayeva et al., (2008)	[191]	0,022	–	–	–
Konuspayeva et al., (2010)	[139]	0,026	0,006	–	–
Akhmetsadykova., (2011)	[168]	0,017	0,006	–	–
Elbagermi et al., (2014)	[192]	0,022	0,278	–	–
Abushaala et al., (2014)	[193]	0,026	0,122	–	–
Damarany., (2015)	[194]	1,360	0,024	–	–
Soltan et al., (2016)	[195]	0,514	0,079	0,320	–
		0,471	0,040	0,230	–
Mostafidi et al., (2016)	[196]	0,004	0,001	8,09 x 10 <sup>-5</sup>	–
Ahmed et al., (2017)	[197]	–	0,311	0,033	–
Parsaei et al., (2017)	[198]	0,003	0,004	–	0,040
Chen et al., (2019)	[199]	0,016	0,002	0,020	–
Shar et al., (2021)	[200]	0,003	0,004	–	–
Bougrinat., (2021)	[201]	–	0,009	–	–
Bahri et al., (2021)	[202]	0,011	–	–	–
		0,654	1,526	0,183	–
		0,348	0,610	0,145	–
Ajarem et al., (2022)	[203]	0,218	0,305	0,137	–
Kamal et al., (2022)	[204]	–	0,064	–	–

- : Pas de données disponibles.

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

**Tableau 6. Quotient de danger (HQ) pour les éléments toxiques (Hg, Pb, Cd et Ni) dans le lait de chamelle pour les enfants.**

Auteur (année)	Référence	Pb	Cd	Ni	Hg
Amin et al., (2008)	[188]	1,589	0,065	3,310	–
Meldebekova et al., (2008)	[189]	0,029	–	–	–
Diacono et al., (2008)	[190]	0,029	–	–	–
Konuspayeva et al., (2008)	[191]	0,029	–	–	–
Konuspayeva et al., (2010)	[139]	0,035	0,008	–	–
Akhmetsadykova., (2011)	[168]	0,023	0,008	–	–
Elbagermi et al., (2014)	[192]	0,029	0,373	–	–
Abushaala et al., (2014)	[193]	0,035	0,164	–	–
Damarany., (2015)	[194]	1,831	0,032	–	–
Soltan et al., (2016)	[195]	0,692	0,106	0,431	–
		0,634	0,053	0,310	–
Mostafidi et al., (2016)	[196]	0,005	0,001	0,001	–
Ahmed et al., (2017)	[197]	NC	0,419	0,045	–
Parsaei et al., (2017)	[198]	0,003	0,005	–	0,032
Chen et al., (2019)	[199]	0,021	0,003	0,027	–
Shar et al., (2021)	[200]	0,003	0,005	–	–
Bougrinat., (2021)	[201]	–	0,011	–	–
Bahri et al., (2021)	[202]	0,014	–	–	–
		0,880	2,054	0,246	–
		0,469	0,822	0,195	–
Ajarem et al., (2022)	[203]	0,293	0,411	0,184	–
		–	0,086	–	–
Kamal et al., (2022)	[204]	–	0,086	–	–

- : Pas de données disponibles.

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

### F. Calcul du risque cancérigène

Le risque cancérigène du Plomb et Cadmium pour les consommateurs de lait de chamelle a été déterminé en calculant la valeur RC. Les valeurs de ces métaux pour les adultes et les enfants ont été calculées sur la base des niveaux moyens des métaux mentionnés (Tableau 7).

**Tableau 7. Risque Cancérigène (RC) pour le Plomb et le Cadmium dans le lait de chamelle pour les adultes et les enfants.**

Auteur (année)	Référence	Adultes		Enfants	
		Pb	Cd	Pb	Cd
Amin et al., (2008)	[188]	$3,511 \times 10^{-5}$	$7,33 \times 10^{-4}$	$4,73 \times 10^{-5}$	$9,86 \times 10^{-4}$
Meldebekova et al., (2008)	[189]	$6,49 \times 10^{-7}$	-	$8,73 \times 10^{-7}$	-
Diacono et al., (2008)	[190]	$6,49 \times 10^{-7}$	-	$8,73 \times 10^{-7}$	-
Konuspayeva et al., (2008)	[191]	$6,49 \times 10^{-7}$	-	$8,73 \times 10^{-7}$	-
Konuspayeva et al., (2010)	[139]	$7,78 \times 10^{-7}$	$9,16 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-6}$	$1,23 \times 10^{-4}$
Akhmetsadykova., (2011)	[168]	$5,19 \times 10^{-7}$	$9,16 \times 10^{-5}$	$6,99 \times 10^{-7}$	$1,23 \times 10^{-4}$
Elbagermi et al., (2014)	[192]	$6,49 \times 10^{-7}$	$4,17 \times 10^{-3}$	$8,73 \times 10^{-7}$	$5,61 \times 10^{-3}$
Abushaala et al., (2014)	[193]	$7,78 \times 10^{-7}$	$1,83 \times 10^{-3}$	$1,05 \times 10^{-6}$	$2,47 \times 10^{-3}$
Damarany., (2015)	[194]	$4,05 \times 10^{-5}$	$3,66 \times 10^{-4}$	$5,45 \times 10^{-5}$	$4,93 \times 10^{-4}$
Soltan et al., (2016)	[195]	$1,53 \times 10^{-5}$	$1,19 \times 10^{-3}$	$2,06 \times 10^{-5}$	$1,60 \times 10^{-3}$
		$1,40 \times 10^{-5}$	$5,95 \times 10^{-4}$	$1,89 \times 10^{-5}$	$8,01 \times 10^{-4}$
Mostafidi et al., (2016)	[196]	$1,16 \times 10^{-5}$	$1,37 \times 10^{-5}$	$1,56 \times 10^{-7}$	$1,85 \times 10^{-5}$
Ahmed et al., (2017)	[197]	-	$4,67 \times 10^{-3}$	-	$6,29 \times 10^{-3}$
Parsaei et al., (2017)	[198]	$8,15 \times 10^{-8}$	$5,59 \times 10^{-5}$	$1,10 \times 10^{-7}$	$7,52 \times 10^{-5}$
Chen et al., (2019)	[199]	$4,72 \times 10^{-7}$	$3,60 \times 10^{-5}$	$6,36 \times 10^{-7}$	$4,85 \times 10^{-5}$
Shar et al., (2021)	[200]	$7,78 \times 10^{-8}$	$5,95 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-7}$	$8,01 \times 10^{-5}$
Bougrinat., (2021)	[201]	-	$1,32 \times 10^{-4}$	-	$1,78 \times 10^{-4}$
Bahri et al., (2021)	[202]	$3,14 \times 10^{-7}$	-	$4,23 \times 10^{-7}$	-
	[203]	$1,95 \times 10^{-5}$	$2,29 \times 10^{-2}$	$2,62 \times 10^{-5}$	$3,08 \times 10^{-2}$
		$1,04 \times 10^{-5}$	$9,16 \times 10^{-3}$	$1,40 \times 10^{-5}$	$1,23 \times 10^{-2}$
Ajarem et al., (2022)		$6,49 \times 10^{-6}$	$4,58 \times 10^{-3}$	$8,73 \times 10^{-6}$	$6,16 \times 10^{-3}$
Kamal et al., (2022)	[204]	-	$9,62 \times 10^{-4}$	-	$1,29 \times 10^{-3}$

- : Pas de données disponibles.

### IV.3. Discussion

#### IV.3.1. Présence des métaux toxiques dans le lait

Le lait de chamelle contient de nombreux nutriments utiles pour la santé humaine et peut fournir une part importante des besoins quotidiens journaliers [205]. Cependant, cette denrée alimentaire peut être exposée à des risques de pollution par les métaux lourds, comme le Plomb et le Cadmium [206]. Ainsi, la présence de métaux toxiques même à faible concentration peut entraîner des perturbations métaboliques et des conséquences graves pour les consommateurs, surtout les nouveau-nés et les enfants [206,207].

Cette revue a inclus 19 études qui traitent des niveaux du Plomb, Cadmium, Mercure et Nickel dans le lait de chamelle à travers le monde. En comparaison, une revue systématique sur les métaux lourds dans le lait de vache comprenait 60 études [174]. Ceci est compréhensible, car la consommation du lait de chamelle reste encore limitée par rapport au lait de vache. Ce lait représente encore moins de 5% de la production mondiale du lait et est limité à certaines régions du monde [208].

La méthode la plus utilisée pour la mesure des métaux lourds dans le lait de chamelle dans les études incluses est la spectrophotométrie à absorption atomique. Ceci peut être expliqué par son faible coût, la détection qui approximativement rapide et les opérations de préparation faciles à réaliser [209,210].

Avec respectivement 17 et 15 études incluses, le Plomb et le Cadmium ont suscité le plus d'études sur le lait de chamelle, car ces métaux sont très toxiques, difficilement biodégradables et facilement transférables aux chaînes alimentaires [211,212]. De plus, l'alimentation est la principale source de Plomb et de Cadmium pour la population générale, bien que l'inhalation puisse jouer un rôle important dans les zones très polluées [213, 214].

L'accumulation de Plomb dans le corps humain est responsable de pathologies neurologiques, digestives, immunitaires, cardiovasculaires et osseuses [215]. Tandis que le Cadmium a des effets nocifs notables sur la santé, tels que la tératogénicité, la cancérogénicité, l'hépatotoxicité, la néphrotoxicité et des impacts négatifs sur les os et les tissus reproducteurs [118].

La concentration de Plomb dans le lait de ces études a dépassé la valeur limite dans 11 études. Des niveaux relativement élevés ont été trouvés dans les échantillons de lait cru en Egypte et en Arabie Saoudite, principalement [187,193,194, 202]. Tandis que les niveaux les plus élevés de Cadmium ont été retrouvés dans le lait cru d'Arabie Saoudite et d'Iran [203].

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

---

Les concentrations de Plomb et de Cadmium dans le lait en Chine étaient inférieures à celles du lait dans d'autres pays en développement [199]. Ceci est en adéquation avec ce qui a été rapporté par Boudebbouz et al., (2021) et qui a rapporté que les concentrations des métaux toxiques dans le lait de pays en développement sont plus importantes que les pays développés [174].

La présence de métaux lourds dans les produits laitiers peut être due à une exposition environnementale ou à la consommation d'aliments et d'eau contenant ces métaux [174,216], qui a pour origine surtout les activités anthropiques [217].

Les métaux peuvent être transférés aux plantes, deviennent de la nourriture pour les animaux, puis traversent le système digestif et sont accumulés dans les tissus et partiellement excrétés dans le lait, exposant ainsi le consommateur [218-220]. Deux études incluses ont suggéré que les voies sol-alimentation-lait et eau-alimentation-lait sont des voies possibles pour le transfert des métaux lourds dans le lait [139,202]. De plus, des recherches expérimentales ont confirmé le transfert de métaux lourds des aliments pour vaches vers le lait [221].

Le Nickel est un élément essentiel, il agit comme cofacteur pour un certain nombre d'enzymes ainsi que d'hormones, mais au-delà de certains niveaux, il peut devenir toxique, et entraîner des dommages cellulaires, une altération des activités enzymatiques et hormonales, un stress oxydatif et une neurotoxicité [222]. En Chine, le Nickel en grandes quantités a été associé à la maladie "du roulis" chez le chameau de Bactriane [223].

Le Mercure provoque des troubles neurologiques et constitue une grave menace pour la santé humaine, en particulier pour le fœtus en développement. En analysant 150 échantillons de lait de chamelle, Parsaei et al., (2019) ont rapporté une concentration moyenne de  $2,36 \pm 0,21 \mu\text{g/Kg}$ . Il s'agit de la seule étude disponible concernant ce métal et il est donc difficile de faire une comparaison [198]. Ziarati et al., (2018) ont rapporté que le niveau du Mercure dans le lait est souvent faible en raison du fonctionnement du corps de l'animal comme filtre biologique efficace [205].

### IV.3.2. Evaluation du risque non cancérigène

Il est largement reconnu que l'exposition alimentaire aux métaux lourds est la principale voie d'exposition. Les valeurs de HQ pour la plupart des métaux identifiés dans le lait ne dépassaient pas 1, à l'exception d'une étude pour le Cadmium (1/15) et le Nickel (1/6) et deux études pour le Plomb (2/17).



## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

---

Ces résultats indiquent un risque négligeable lors de la consommation du lait de chamelle. Le HQ augmente avec l'augmentation de la consommation de lait et la diminution du poids corporel.

Ainsi, nous avons observé un risque relativement plus élevé chez les enfants que chez les adultes, ce qui est cohérent avec les résultats des études existantes. Par exemple en Algérie, les enfants (<18 ans) présentaient un risque non cancérigène pour la santé légèrement plus élevé (HQ pour le Plomb =0,014) que les adultes (HQ pour le Pb=0,011) [202].

Malgré le risque négligeable pour la santé constaté dans cette revue, l'exposition alimentaire aux métaux peut entraîner des risques pour la santé humaine [138]. De plus, un risque négligeable n'indique pas l'absence de risque pour la santé. Des études épidémiologiques ont montré que la présence de faibles concentrations de métaux dans l'urine est associée au risque de diabète [224] et de troubles cardiaques [225].

### IV.3.3. Evaluation du risque cancérigène du Plomb et du Cadmium

Bien que divers facteurs contenant l'âge, l'ethnicité et le sexe soient importants dans le développement du cancer, de nombreuses recherches ont indiqué que l'exposition à des contaminants environnementaux, tels que les métaux lourds, augmente le risque de cancer [226].

La description du risque de cancer peut être caractérisée selon trois niveaux ; une valeur limite inférieure de  $10^{-6}$  qui est la limite de sécurité, une valeur limite supérieure de  $10^{-4}$  qui est la limite du seuil de risque et enfin une valeur supérieure à  $10^{-3}$  qui est la limite du risque considérable [227].

Les résultats ont montré que les deux groupes étudiés pour cinq études sur 16 se situaient dans le seuil de risque de développer un cancer ( $RC > 10^{-6}$ ) en consommant du lait [188,194-196, 203]. Le risque était plus important pour le Cadmium ou toutes les études ( $n=15$ ) avaient un risque supérieur à  $10^{-6}$ . Le risque cancérigène moyen du Cadmium était supérieur à  $10^{-6}$  mais inférieur à  $10^{-4}$  pour les adultes et les enfants, suggérant un potentiel risque cancérigène [228]. Le Cadmium s'est avéré être le contributeur le plus élevé au risque total de cancer pour les deux groupes. Le RC maximal du Plomb pour les enfants a été déterminé comme étant de  $4,73 \times 10^{-5}$ , soit environ 1,5 fois plus que les adultes ( $3,511 \times 10^{-5}$ ). Le risque total de cancer était donc légèrement plus élevé chez les enfants. L'ingestion de lait de façon quotidienne peut être donc responsable de cancer chez les grands consommateurs de lait camelin.

## CHAPITRE IV REVUE SYSTEMATIQUE SUR LA PRESENCE DES METAUX DANS LE LAIT DE CHAMELLE

---

Sur la base de cet examen systématique des niveaux de métaux dans le lait de chamelle, la recherche dans ce domaine au niveau mondiale reste limitée. Les données enregistrées dans cette revue systématique montrent la difficulté de comprendre l'aspect multiforme de la sécurité alimentaire lié à la consommation de cette denrée.

De plus, la variabilité des procédures analytiques et le manque de précision de la méthodologie utilisée par plusieurs auteurs, entraînant des résultats très contradictoires, conduisent à considérer certaines données publiées comme très discutables.

Un effort important devrait être fait par la communauté scientifique pour établir un statut clair de la composition minérale du lait de chamelle expliquant potentiellement certains des effets sur la santé attribués. L'actualisation des données et la surveillance continue sont nécessaires et recommandées pour évaluer les effets néfastes potentiels des métaux lourds sur la santé humaine et animale dans les études futures.

Bien que les résultats du HQ n'aient suggéré aucun risque sanitaire non cancérigène de contamination par les métaux dans le lait, les résultats du risque cancérigène montrent un risque surtout lié à la présence du Cadmium.

Chapitre V  
Réglementation  
concernant la teneur des  
métaux dans le lait

## CHAPITRE V RÉGLEMENTATION CONCERNANT LA TENEUR DES MÉTAUX DANS LE LAIT

---

Dans ce chapitre, nous examinerons la réglementation des métaux lourds dans le lait, en mettant l'accent sur les principales normes internationales et les limites maximales tolérées des métaux dans le lait [205].

### V.1. Organismes de réglementation internationaux

Une série de paramètres ont été fixés par les gouvernements et les organisations pour évaluer l'intoxication aux métaux lourds chez l'homme, tels que la limite maximale de résidus (LMR) dans les aliments, la dose journalière tolérable (DJT), la dose hebdomadaire tolérable provisoire (DHTP) et la dose hebdomadaire tolérable (DHT). Les limites de sécurité de référence sont réglementées par plusieurs instances comme le ministère américain de la Santé et des Services sociaux (Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)), le Comité d'experts FAO/OMS sur les additifs alimentaires (JECFA), l'autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) et l'Organisation mondiale de la santé.

Plusieurs organismes internationaux jouent un rôle crucial dans l'établissement de normes de sécurité alimentaire concernant les métaux lourds, notamment dans les produits laitiers. La Commission du *Codex Alimentarius*, qui est un organe conjoint de l'OMS et de la FAO, émettent des directives et des normes pour les niveaux de métaux lourds acceptables dans les aliments. Ces normes aident les gouvernements et les industries alimentaires à définir des limites tolérables pour les métaux lourds dans le lait et autres produits laitiers [176].

### V.2. Limites Maximales de résidus

Les limites maximales de résidus (LMR) sont les concentrations de métaux lourds au-dessus desquelles un produit laitier est considéré comme non conforme aux normes de sécurité alimentaire. Les LMR varient en fonction du métal en question et du pays ou de la région spécifique. Ces LMR visent à réduire l'exposition humaine aux métaux lourds tout en prenant en compte les niveaux naturels de métaux présents dans l'environnement [176]. Dans ce cadre, les autorités sanitaires internationales ont fixé des apports maximaux tolérables pour les métaux toxiques et les éléments essentiels (pour ceux qui produisent des effets indésirables) [229-231]. Le niveau maximal autorisé de Plomb dans le lait recommandé par la Commission du *Codex Alimentarius* est de 20µg/Kg [175].



## CHAPITRE V REGLEMENTATION CONCERNANT LA TENEUR DES METAUX DANS LE LAIT

---

La limite maximale autorisée pour le Cadmium dans le lait recommandé par la FAO/OMS est de 10µg/Kg [176]. La limite maximale du Cadmium dans le lait selon la Fédération internationale de laiterie est de 2,6µg/Kg [232]. Les limites maximales admissibles pour le Nickel et le Mercure dans le lait ne sont signalées par aucun des organismes de réglementation dans le monde.



Partie pratique

Objectifs du travail

## **OBJECTIFS**

### **1. Objectif principal**

Évaluer l'impact de la contamination métallique du lait de la chamelle au niveau du Sud-Est de l'Algérie par la mesure des concentrations du Plomb (Pb), Cadmium (Cd), Mercure (Hg) et du Nickel (Ni).

### **2. Objectifs secondaires**

- a. Validation des méthodes de dosage analytiques du dosage du Plomb, Cadmium et Nickel dans le lait de chamelle ainsi que dans le sol, l'eau d'abreuvement et les plantes des élevages camelin par spectrométrie d'absorption atomique avec four à graphite (SAA-FG) ;
- b. Évaluation des niveaux de pollution métallique autour des élevages de dromadaire par élaboration d'un indice de risque de pollution pour les élevages et la mesure des concentrations des métaux dans le sol, l'eau d'abreuvement et les plantes consommées par les dromadaires ;
- c. Calcul du risque cancérigène (Plomb et Cadmium) et non cancérigène (Plomb, Cadmium, Mercure, Nickel) lié à la consommation du lait de chamelle.

Pour la réalisation du présent travail, plusieurs techniques ont été mise en œuvre faisant appel à des disciplines aussi diverses que la cartographie, la toxicologie et les statistiques par la mise en œuvre d'un système d'indice pour localiser, identifier et évaluer semi-quantitativement les sources de pollution situées près des élevages échantillonnés ; de différentes méthodes pour la détermination des métaux lourds dans les matrices environnementales et le lait de chamelle ; et enfin de techniques d'évaluation probabiliste du risque cancérigène et non cancérigène.

En dépit du fait que le Mercure (Hg) ne soit pas inclus parmi les objectifs initiaux de la thèse, son incorporation dans les objectifs et son dosage dans le lait ont aussi été ajoutés pour enrichir la compréhension des risques potentiels pour la santé liés à l'exposition aux métaux lourds dans le lait de chamelle. Ceci s'explique par des raisons analytiques (automate de dosage du Mercure fonctionnel et méthode analytique déjà validée) et toxicologiques (propriétés toxiques et persistance dans l'environnement, élément fréquemment étudié dans les produits alimentaires).



# Chapitre I

## Matériel et méthodes

## I.1. Méthodes

### I.1.1. Type d'étude

Il s'agit d'une étude transversale à visée descriptive qui porte sur la détermination du risque sanitaire lié à la présence de métaux toxiques (Pb, Cd, Hg, Ni) dans le lait de chamelle. Cette étude a été réalisée grâce à la mesure de la concentration des éléments traces métalliques dans le lait de chamelle cru ainsi que dans les matrices environnementales des élevages (sol, plantes et eau d'abreuvement).

Notre travail s'est focalisé sur dix élevages de dromadaires de type intensif qui proposent la vente du lait cru à proximité des routes principales jonchant la route de Biskra vers Ghardaïa. Les analyses des métaux ont été réalisées au niveau du Plateau Technique de Ouargla du Centre de Recherche en Analyses Physico-Chimiques (PT-CRAPC-Ouargla).

### I.1.2. Présentation de l'étude

L'étude a été menée au niveau du Sahara septentrional algérien, dans la région Nord-Est de l'Algérie, là où la concentration de dromadaire est importante (le nombre de chameles dans la zone d'étude est de 70332 et représente environ 27% du cheptel national algérien de chameles, selon les statistiques du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural en 2019) [233]. Les élevages sélectionnés se trouvent à proximité de la route nationale principale qui relie la ville de Biskra à Ghardaïa en passant par la ville de Ouargla.

#### A. Population animale étudiée

La justification du nombre d'animaux, d'échantillons prélevés et de leur représentativité revêt une importance cruciale pour assurer la fiabilité des résultats obtenus dans le cadre de cette étude. La méthode privilégiée pour le calcul de la taille de l'échantillon a été l'analyse de puissance. Cette approche est similaire à celle utilisée pour le calcul de la taille de l'échantillon pour les essais cliniques [234].

Nous avons ainsi utilisé le logiciel gratuit et libre de droit « G Power, *version 3.1.9* », recommandé pour les études sur les animaux en programmant les paramètres suivants :

- Erreur de type 1 : mesurée par le niveau de signification, généralement fixé à un niveau de 5% ( $p = 0,05$ ). Cette valeur seuil est couramment utilisée pour évaluer le risque d'erreur dans les analyses statistiques [235, 236] ;

- Puissance : la puissance d'une étude est la probabilité de détecter un effet que l'étude cherche à trouver. Celle-ci peut être maintenue entre 80% et même 99%, en fonction de la question de recherche [235, 236]. Pour notre étude, nous avons fixé une valeur de 95% ;
- Taille de la population animale : le nombre de chamelles dans la zone d'étude est de 70332 en 2019 [233].

Selon les paramètres choisis, la taille de l'échantillon de chamelles nécessaire pour assurer une bonne représentativité était de « 54 chamelles ». Ce chiffre a été arrondi à « 80 chamelles » se trouvant sur les dix sites d'élevages sélectionnés.

Par ailleurs et compte tenu de la difficulté de faire des prélèvements individuels de lait pour chaque chamelle, nous avons pris en considération la variabilité saisonnière et les conditions météorologiques pour planifier la collecte d'échantillons tout au long de l'année. Cette approche vise à capturer des données qui reflètent la diversité des conditions environnementales dans la région d'étude.

### **B. Zone d'étude**

La superficie totale de la zone d'étude est de 374329 km<sup>2</sup> et soumise à un climat désertique. Elle se présente comme une zone de transition entre les steppes méditerranéennes nord africaines et le Sahara central. La zone d'étude est connue par sa morphologie sableuse avec des plates formes pierreuses (ergs et hammadas) et se trouve au nord-est de la plateforme saharienne appartenant au Craton Nord-Africain. Elle est caractérisée par une topographie plutôt plate, recouverte de dépôts dunaires qui s'étendent sur les grandes couches sédimentaires continentales des ères tertiaire et quaternaire, ainsi que sur quelques formations sédimentaires marines du cénozoïque.

La description météorologique est le résultat d'une synthèse climatique réalisée à partir des données de l'Office National de Météorologie algérien (ONM) concernant les stations principales de la région d'étude, à savoir Ouargla, et Touggourt :

- En automne, les températures maximales descendent progressivement jusqu'à environ 25°C en novembre, mais l'air reste sec. Les vents sont souvent moins forts et les coups de Sirocco se font de plus en plus rares. C'est également la saison des précipitations, bien que celles-ci soient généralement très faibles [237].
- En hiver, les températures moyennes sont inférieures à 15°C, avec une faible humidité. Les nuits sont relativement froides, avec parfois des gelées en décembre et en janvier.

Les vents sont globalement moins violents à cette période de l'année, mais connaissent une recrudescence en février [237].

- Au printemps, une forte amplitude thermique entre le jour et la nuit est notée, d'environ quinze degrés en moyenne. Les températures augmentent très rapidement l'après-midi, et quelques rares pluies et orages sont possibles en mars et avril. C'est également la saison de vents violents [237].
- L'été est la saison la plus chaude de l'année, avec des températures de jour moyennes atteignant 43°C et des pointes à environ 55°C. L'air est très sec et les vents fréquents et assez forts soulèvent de la poussière et du sable. La durée d'ensoleillement est maximale, avec 12 à 13 heures par jour [237].

Le vent est l'un des facteurs les plus importants du climat de la région et peut provoquer des variations de températures et d'humidité [238]. Les données météorologiques indiquent que les vents principaux dans la région d'étude soufflent généralement du Sud et de l'Ouest, avec une vitesse moyenne mensuelle variant entre 12,06km/h et 28,16km/h. Pendant les demi-saisons, la vitesse des vents de sable peut atteindre 100km/h. La région est également caractérisée par le Sirocco, un vent chaud et sec souvent associé à des particules de sable et de terre, fréquent pendant la période estivale. Le total annuel des précipitations est extrêmement variable d'une année à l'autre et peut être nul pendant une ou plusieurs années [238].

Dans cette région, dix sites ont été sélectionnés pour la collecte des échantillons dans le but d'examiner spécifiquement l'impact des variations saisonnières et géographiques sur les niveaux de contamination métallique du lait de chamelle, ainsi que les matrices environnementales des élevages. Il s'agit d'élevages de dromadaires avec un système intensif dont les propriétaires vendent du lait de chamelle à proximité des routes nationales qui relient les principales villes du Sud-est algérien (Figure 9).

Les localisations GPS (Global Positioning System) des élevages sélectionnés sont retrouvées au niveau de l'annexe 1 du document.

Les zones échantillonnées se situaient dans 4 wilayas d'Algérie où la concentration cameline était parmi les plus fortes et où les risques de pollution étaient patents. Les substances polluantes dans la région sont les hydrocarbures et les métaux émis par les industries de production d'énergie, ainsi que la pollution automobile également élevée [239].

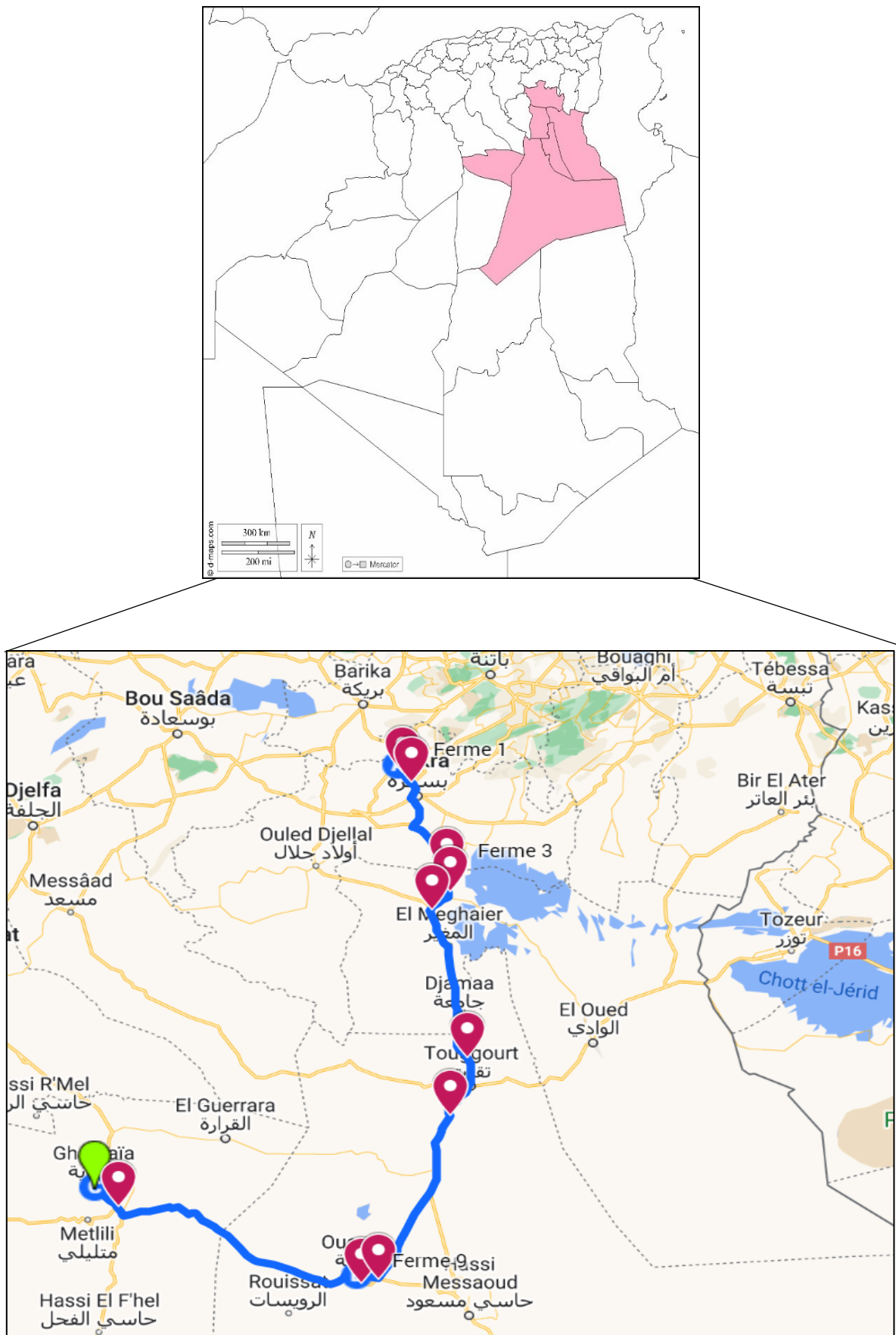


Figure 9. Localisation des dix élevages sélectionnés dans l'étude.

### **C. Période de l'étude**

La période d'étude s'est étendue sur 9 mois allant de janvier à septembre 2021. Les échantillons de lait de chamelle cru ainsi que les échantillons environnementaux (sol, eau d'abreuvement et plantes aux alentours des sites) issus de chaque site d'élevage ont été prélevés chaque trimestre, pour couvrir les quatre saisons de l'année [automne (septembre 2021), hiver (janvier 2021), printemps (mars 2021), été (juin 2021)]. Ils ont ensuite été soumis à la quantification des éléments traces métalliques (Pb, Cd, Ni et Hg).

### **I.1.3. Critères d'inclusion et de non inclusion**

#### **A. Critères d'inclusion**

Tout élevage camelin se situant le long de la route nationale principale qui relie la ville de Biskra à Ghardaïa, en passant par la ville de Ouargla et qui propose du lait de chamelle cru en vente aux bords des routes pour les voyageurs.

#### **B. Critères de non inclusion**

Il est important de bien définir les critères de non inclusion afin de garantir une représentativité et une fiabilité des résultats obtenus :

- Les élevages camelins situés en dehors de la route nationale ne sont pas inclus ;
- Les élevages avec un système d'élevage extensif ;
- Les élevages situés sur la route nationale, mais qui ne proposent pas de lait en vente ;
- Les élevages proposant du lait d'autres espèces (brebis ou vaches).

### **I.1.4. Analyse environnementale et spatiale des élevages de l'étude**

#### **A. Principe de l'analyse**

Le diagnostic spatial (la cartographie) est une méthode largement utilisée dans les études environnementales pour comprendre l'impact des activités humaines sur un territoire donné. Cette méthode consiste à recueillir des données sur l'environnement, les polluants présents dans le sol, l'eau, l'air et les espèces animales et végétales qui y vivent.

Elle peut servir à identifier les zones les plus touchées par la pollution, à évaluer l'efficacité des mesures prises pour réduire la pollution, ou encore à suivre l'évolution de l'état environnemental du territoire au fil du temps. L'utilisation d'indicateurs de pollution permet d'identifier les activités qui contribuent le plus à la pollution de l'environnement étudié [139].

### **B. Récolte des données**

Pour effectuer l'étude spatiale, les points GPS de chaque site d'échantillonnage et de chaque source de pollution identifiée ont été notés en utilisant l'application Google Maps, présente sur système Android afin de relever les informations suivantes :

- Hydrologie (source et qualité d'eau consommées par les dromadaires) ;
- Occupation des sols (agriculture, industrie, routes...).

Les sources de pollutions recherchées lors de l'étude ont été :

- L'intensité du trafic routier ;
- La présence de site industriel ;
- La présence d'activités agricoles ;
- La proximité de stations d'essence ;
- La distance des élevages sélectionnés aux villes.

### **C. Indicateurs de risques de pollution**

Afin de présenter les renseignements environnementaux et d'exploiter plus facilement les données, les différentes informations ont été présentées sous forme d'indicateurs, ce qui a permis de comparer les niveaux de risque de pollution selon les sites.

Ces indicateurs ont été adaptés de l'étude de Konuspayeva et al., (2009) qui ont étudié la pollution métallique du lait de chamelle au niveau de multiples élevages du Kazakhstan [191]. Les valeurs des différents indicateurs ont ensuite été agrégées afin d'obtenir un indicateur synthétique représentant le risque pour chaque élevage.

En fonction de la source de pollution identifiée et des données, les indices suivants ont été retenus :

- Présence de déchets dans les élevages : les déchets qui restent sur les sites se décomposent et déposent des toxiques peu solubles qui peuvent être ingérés par les animaux dans ces zones.
  - 0 : absence de déchets.
  - 1 : déchets personnels de l'élevage.
  - 2 : décharge.
- Circulation de véhicules motorisés : responsables de dépôts de Plomb dans le sol.
  - 0 : absence.
  - 1 : présence.

- Proximité d'une route à circulation importante : la retombée du Plomb le long des routes à trafic important (axe routier principal) a été retenue pour une distance de 500 m.

- 0 : route éloignée de plus de 500 m.
- 1 : route à moins de 500 m.

- Proximité d'une station d'essence : la retombée des activités anthropiques issues des stations d'essence a été retenue pour une distance de 5 km.

- 0 : absence
- 1 : présence à moins de 5 km.
- 2 : présence à moins de 2 km.

- Distance d'usines, de villes, de champ minier ou de pétrole : la dispersion des polluants émis par se fait principalement par les rejets dans l'atmosphère. Nous avons retenu un rayon de 5 km pour les retombées proches des particules les plus lourdes.

- 0 : usine à plus de 40 km.
- 1 : usine entre 20 km et 40 km.
- 2 : usine entre 5 et 20 km.
- 3 : usine à moins de 5 km.

### **I.1.5. Paramètres à étudier et critères de choix des métaux à analyser**

- Lait de chamelle : dosage du Plomb, Cadmium, Nickel et Mercure, détermination du facteur de transfert des métaux plantes-lait, estimation du risque cancérigène et non cancérigène lié à la consommation du lait ;
- Sol des élevages : dosage du Plomb, Cadmium et Nickel, ainsi que la détermination de l'index de géoaccumulation ;
- Plantes aux alentours des élevages : dosage du Plomb, Cadmium, ainsi que la détermination du facteur de transfert des métaux sol-plantes ;
- Eau d'abreuvement des élevages : dosage du Plomb, Cadmium et Nickel et Mercure.

La sélection des métaux à doser, à savoir le Plomb, le Cadmium, le Nickel et le Mercure, a été guidée par plusieurs critères pour assurer la portée de la recherche :

- Toxicité élevée : les métaux choisis, notamment le Plomb, le Cadmium et le Mercure, sont connus pour leur toxicité élevée (que ce soit après exposition aiguë ou chronique) et leur capacité à induire des effets néfastes sur la santé humaine même à des concentrations relativement faibles.



- De plus, leur impact sur les processus cellulaires et les organes a été largement documenté dans la littérature scientifique [116-136] ;
- Prévalence dans l'environnement : le choix des métaux s'est également basé sur leur prévalence dans l'environnement, avec une attention particulière portée aux sources anthropiques et naturelles de contamination dans la zone d'étude (industrie pétrolière, stations d'essence) ;
- Contaminants fréquemment étudiés dans le lait : la revue systématique de la littérature a montré que les métaux sélectionnés sont fréquemment étudiés et détectés dans le lait de chamelle.

### **I.1.6. Collecte des échantillons**

Au cours de notre étude, un total de 120 échantillons de lait de chamelle brut, ainsi que 40 échantillons d'eau d'abreuvement, 40 échantillons de sol et 40 échantillons de plantes, ont été collectés dans les dix élevages intensifs sélectionnés.

Cette collecte s'est étendue de janvier à septembre 2021, avec 30 échantillons de lait et 10 échantillons d'eau, de sol et de végétation prélevés lors de chaque campagne, à savoir janvier, mars, juin et septembre 2021.

#### **A. Echantillonnage du sol**

L'échantillonnage a été réalisé selon les méthodes décrites par différentes études d'analyse des teneurs en métaux lourds dans les sols [240,241]. Durant chaque saison, les échantillons issus des élevages ont été collectés à une profondeur de 15 à 20cm suivant une méthode de prélèvement au hasard. 500g environ ont été réunis et homogénéisés dans des sachets en papier kraft. Ainsi, un échantillon par élevage et par campagne a été collecté. Les échantillons ont été ensuite conservés à température ambiante jusqu'au temps d'analyse.

#### **B. Echantillonnage de l'eau d'abreuvement**

Pour chaque élevage, l'eau d'abreuvement a été prélevée dans une bouteille en polyéthylène téréphtalate (PET) comme indiqué dans la ligne directrice d'échantillonnage « ISO 5667-15 : 2009 » concernant la qualité de l'eau. Au total, 40 échantillons ont été collectés (10 échantillons par saison) et conservés au niveau du réfrigérateur à 4°C en attendant d'être analysés. La Figure 10 montre un exemple d'une source d'eau d'abreuvement pour les animaux.




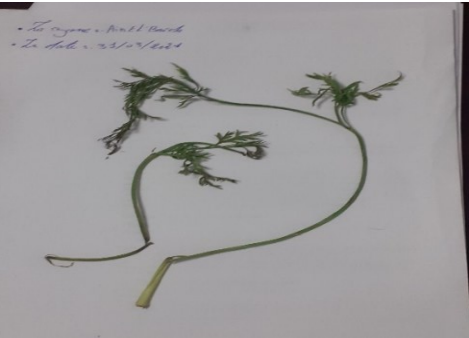
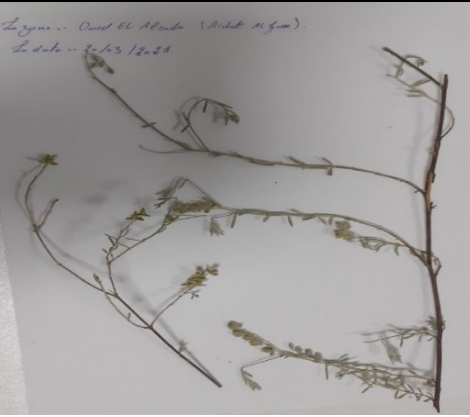

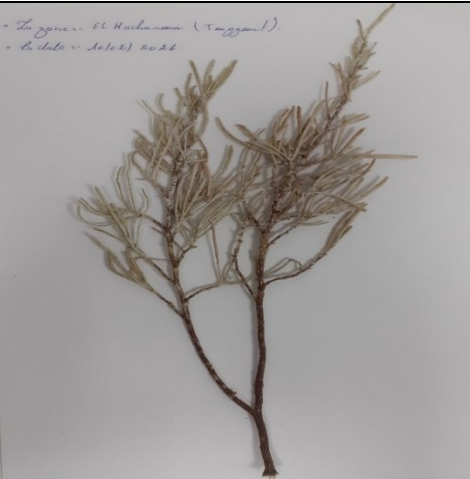
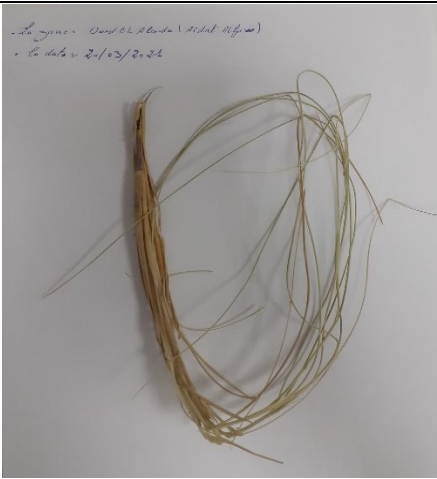
**Figure 10. Exemple d'une source d'eau d'abreuvement pour les animaux.**

### **C. Echantillonnage des plantes**

Lors de chaque campagne de collecte, un échantillon d'espèce végétale a également été récupéré en parallèle pour chaque zone d'élevage. Seule la portion possiblement consommée par l'animal a été prélevée (c'est-à-dire la partie aérienne de la plante). Plusieurs espèces différentes ont été récoltées au niveau des sites d'élevage (une plante par campagne et par site d'élevage). Les compléments alimentaires donnés par les éleveurs n'ont pas été prélevés.

L'identification botanique des plantes récoltées a été délicate, cependant certaines espèces ont pu être identifiées, dans la mesure du possible, de façon sommaire selon le catalogue des plantes spontanées du Sahara septentrional algérien élaboré par Chehma, (2006) [242] et sont répertoriées dans le Tableau 8.

**Tableau 8. Identification botanique des certaines espèces prélevées lors de la campagne d'échantillonnage selon le catalogue des plantes spontanées du Sahara septentrional algérien [242].**

Identification botanique de certaines espèces collectées	
	
<i>Oudneya africana</i> R. Br.	<i>Helianthemum lippii</i> (L.) Pers.
	
<i>Helianthemum lippii</i> (L.) Pers.	<i>Anvillea radiata</i> L.
	
<i>Acacia nilotica</i> (L.) Willd. ex Del.	<i>Pituranthos chloranthus</i>

### D. Echantillonnage du lait

Un total de 120 échantillons a été collecté pendant les quatre campagnes d'échantillonnages. Les chamelles sont pour la plupart traitées le matin (entre 4h et 8h du matin) par un système de traite manuelle dans un sceau (Figure 11). La collecte de lait chez la chamelle peut être parfois difficile sans la présence du chamelon, si l'animal n'est pas habitué à être traité.

Malgré la présence de plusieurs chamelles dans les élevages examinés, les échantillons de lait collectés sont en réalité un mélange provenant de plusieurs d'entre elles. Ces échantillons ont été prélevés immédiatement après la traite, lorsqu'ils sont mélangés et stockés dans des bouteilles en PET.



**Figure 11. Traite d'une chamelle par un jeune enfant.**

### E. Transport des échantillons

Les échantillons de lait et d'eau d'abreuvement ont été transportés à l'aide d'une glacière jusqu'au laboratoire de toxicologie dans l'hôpital Mohamed Boudiaf de Ouargla dans les 24 heures suivant le recueil. Ils ont été conservés au congélateur (congelés à  $-20^{\circ}\text{C}$ ) jusqu'à l'analyse ultérieure. Les échantillons de sol et de plantes ont par ailleurs été conservés à température ambiante.

Des précautions additionnelles ont été prises lors de la conservation des échantillons afin d'éviter toutes contaminations supplémentaires, évitant notamment l'usage de tout matériel métallique.

### I.1.7. Préparation et prétraitement des échantillons pour le dosage des métaux

La préparation et l'analyse des échantillons ont été réalisées au niveau Plateau Technique de Ouargla du Centre de Recherche en Analyses Physico-Chimiques (PT-CRAPC-Ouargla).

La détermination des teneurs en métaux dans les différentes matrices a exigé une minéralisation préalable. L'objectif de cette procédure est d'extraire les éléments traces présents dans les composés carbonés. Nous allons détailler ci-dessous les protocoles de minéralisation réalisés pour chaque matrice.

Avant minéralisation, la verrerie a été nettoyée avec une solution d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) à 10%, puis lavée avec de l'eau ultrapure. Toutes les minéralisations suivies dans notre protocole sont des minéralisations par voie humide assistées par un four à micro-ondes.

#### A. Préparation et minéralisation des échantillons de sol

Les échantillons reçus dans le laboratoire ont été séchés à l'air ambiant pendant 4 jours suivis d'un séchage au four à  $60^\circ\text{C}$  pendant 2 jours, en prenant soin de retirer manuellement tout matériau étranger ou débris récoltés pendant la collecte. Ils ont ensuite été tamisés avec un tamis de 2 mm de diamètre, ce qui a permis de retirer les grosses particules qui pourraient perturber l'homogénéité et la précision des résultats.

En second lieu, 1,00g de l'échantillon séché obtenu a été traité avec un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique (un volume d'acide nitrique à 65% et trois volumes d'acide chlorhydrique à 37%). La solution obtenue a été placée dans des réacteurs téflon (Figure 12) qui ont été délicatement introduits dans le four à micro-ondes.

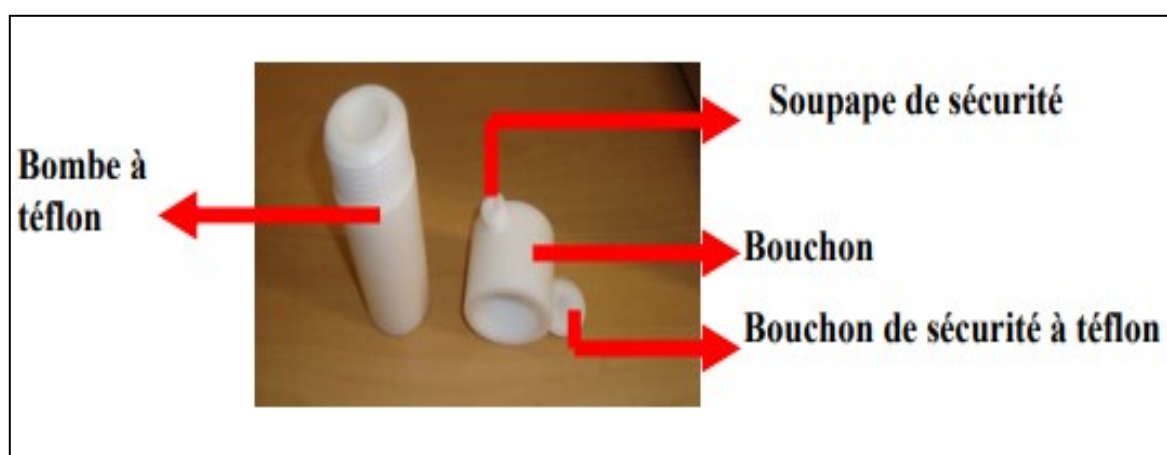


Figure 12. Godets en téflon utilisés pour la minéralisation de la matière organique.

La minéralisation a été assistée par le four à micro-ondes « Topwave<sup>®</sup> » de la marque Analytik-Jena<sup>®</sup> (Figure 13). Pour finir, l'échantillon minéralisé a été filtré et dilué jusqu'à 25ml avec de l'eau ultrapure.



**Figure 13. Four à micro-ondes de la marque Analytik-Jena<sup>®</sup>.**

Le Tableau 9 résume les caractéristiques du programme de température de pression utilisé pour la minéralisation des échantillons de sol. Le programme de température et de pression utilisé pour la minéralisation du sol est dérivé de la méthode EPA 3052 et a été optimisé par le fournisseur du four à micro-ondes « Analytik Jena<sup>®</sup> » pour répondre spécifiquement aux exigences de la minéralisation des sols [243].

**Tableau 9. Programme de température et de pression pour la minéralisation du sol  
fourni par Analytik Jena [243].**

Étapes	Rampe (min)	Temps (min)	Température (°C)	Puissance (%)	Pression (bar)
1	5	5	175	100	30
2	1	15	50	00	30

### **B. Préparation et minéralisation des échantillons de plantes**

Les échantillons de plantes récoltés ont été soumis à un séchage à l'étuve en utilisant une température de 70°C pendant 48 heures. Les plantes séchées ont été broyées par un homogénéisateur à billes en utilisant une vitesse de 800G et une température de 23°C pendant 15minutes.

Ils ont été ensuite tamisés en utilisant des tamis de différentes tailles (1mm, 800 $\mu$ m, 400 $\mu$ m et 315 $\mu$ m) pendant 5 minutes, avec une vitesse de tamisage de 1,48mm/g.

La minéralisation a été réalisée par voie humide en utilisant une méthode assistée par four à micro-ondes, selon le protocole de Chaouali et al., (2018), qui utilise un acide fort (acide nitrique concentré) en présence d'un agent oxydant (eau oxygénée pure) [244].

Dix grammes de matériel végétal, broyé et bien sec, ont été mélangés avec 5ml d'acide nitrique à 65% et 2ml d'eau oxygénée à 32%, dans des réacteurs en téflon [244]. Les godets ont été ensuite placés dans le four à micro-ondes, selon le programme thermique spécifique ci-dessous (Tableau 10).

**Tableau 10. Programme thermique de la minéralisation de la matière végétale selon le protocole de Chaouali et al., (2018) [244].**

Étapes	Rampe (min)	Temps (min)	Température (°C)	Puissance (%)	Pression (bar)
1	5	10	170	70	30
2	1	15	200	90	30
3	1	10	75	00	30
4	1	10	75		
5	1	1	75		

Les échantillons ont été ensuite refroidis et récupérés dans des fioles de 50ml puis dilués par de l'eau ultrapure jusqu'au trait de jauge.

### C. Préparation et minéralisation des échantillons de lait de chamelle

Les échantillons de lait ont été décongelés avant d'être prélevés à hauteur de 5,00 g pour chaque échantillon.

Dans le processus de minéralisation et pour chaque bombe à téflon, une quantité de 5,00 g du lait a été ajoutée, suivie de 8ml d'acide nitrique et de 2ml d'eau oxygénée, en accord avec les pratiques établies dans plusieurs études de la littérature qui ont utilisé le même protocole [245-247]. Le programme thermique du four à micro-ondes est décrit dans le Tableau 11.

**Tableau 11. Programme thermique de la minéralisation du lait fourni par Analytik Jena [243].**

Étapes	Rampe (min)	Temps (min)	Température (°C)	Puissance (%)	Pression (bar)
1	5	10	165	70	30
2	5	20	190	90	30
3	1	10	50	00	30

A la fin du programme, les bombes à téflon ont été refroidies à température ambiante puis ouvertes dans une chambre d'aspiration pour éviter l'inspiration de gaz toxiques formés lors de la minéralisation. Le minéralisât a ensuite été complété jusqu'à 50ml avec de l'eau ultrapure (Figure 14).



**Figure 14. Dilution des échantillons de lait minéralisés.**

### **I.1.8. Dosage des éléments traces métalliques (Plomb, Cadmium, Nickel)**

Les dosages des métaux ont été réalisés au niveau du laboratoire du Centre de Recherche en Analyse Physico-Chimiques de Ouargla, Algérie.

Les dosages du Plomb, Cadmium et Nickel ont été effectués par la méthode de spectrométrie d'absorption atomique avec four à graphite (SAA-FG) à l'aide de l'automate « ContrAA 800D<sup>®</sup> » de la marque Analytikjena<sup>®</sup>. Cet appareil est muni d'un spectromètre d'absorption atomique, d'un brûleur en graphite à haute efficacité, d'un échantillonneur automatique et d'une lampe multi-élémentaire (Figure 15). De plus, l'argon de haute pureté (99,9%) a été utilisé comme gaz vecteur.





**Figure 15. Spectrophotomètre d'absorption atomique ContrAA 800.**

Avant d'effectuer les analyses, des solutions standards ont été préparées quotidiennement en diluant des solutions standards pures (1000mg/l) de nitrate de Plomb, nitrate de Cadmium et nitrate de Nickel de la marque Merck® et ceci pour être utilisées dans les processus de validation analytique et de contrôle qualité.

La verrerie utilisée a été lavée avec un détergent, puis rincée avec de l'eau ultrapure et enfin immergée dans de l'acide nitrique à 10% pendant plusieurs heures, suivie d'un rinçage à l'eau ultrapure. La méthode d'étalonnage utilisée est celle de l'étalonnage externe.

## **A. Conditions analytiques**

### **a. Conditions analytiques du dosage du Plomb**

Les conditions opératoires utilisées dans l'analyse du Plomb comprenaient une longueur d'onde de 217,05nm et une fente de 0,7nm. Le volume de l'échantillon était de 20µl et le volume de modificateur de matrice était de 5µl. L'utilisation de modificateurs de matrice présente l'intérêt de réduire totalement ou partiellement les interférences et le bruit de fond en augmentant la stabilité thermique des composés à analyser à des températures de décomposition plus élevées. L'ammonium dihydrogénophosphate a été utilisé pour le dosage du Plomb.

Le Tableau 12 résume les paramètres du programme thermique pour le dosage du Plomb qui se divise en plusieurs étapes.

**Tableau 12. Programme thermique du four pour le dosage du Plomb.**

Etapes	Nom	Température (°C)	Rampe (°C/s)	Hold (s)	Temps (s)
1	Séchage	80	6	20	28,2
2	Séchage	90	3	20	23,3
3	Séchage	110	5	10	14
4	Pyrolyse	350	50	20	24,8
5	Pyrolyse	800	300	10	11,5
6	Adaptation	800	0	5	5,0
7	Atomisation	1500	1500	4	4,5
8	Nettoyage	2450	500	4	5,9

### b. Conditions analytiques du dosage du Cadmium

Une longueur d'onde de 228,80nm et une fente de 0,7nm ont été sélectionnées comme conditions pour le dosage du Cadmium. Le volume de l'échantillon était de 20 $\mu$ l et le volume de modificateur de matrice (ammonium dihydrogénophosphate) était de 5 $\mu$ l.

Les paramètres du programme thermique utilisé ont été sélectionnés en fonction de la meilleure absorbance et du bruit de fond le plus faible et sont résumés dans le Tableau 13.

**Tableau 13. Programme thermique du four pour le dosage du Cadmium.**

Etapes	Nom	Température (°C)	Rampe (°C/s)	Hold (s)	Temps (s)
1	Séchage	80	6	20	28.2
2	Séchage	90	3	20	23.3
3	Séchage	110	5	10	14
4	Pyrolyse	350	50	20	24.8
5	Pyrolyse	600	300	10	10.8
6	Adaptation	600	0	5	5.0
7	Atomisation	1200	1400	3	3.4
8	Nettoyage	2450	500	4	6.5

### c. Conditions analytiques du dosage du Nickel

Les conditions opératoires utilisées pour le dosage du Nickel ont compris une longueur d'onde de 232,00nm et une fente de 0,7nm. L'argon a été utilisé comme gaz vecteur, tandis que le volume d'échantillon était de 20 $\mu$ l et le volume de modificateur de matrice était de 5 $\mu$ l. Du nitrate de magnésium a été utilisé comme modificateur de matrice.

Les paramètres du programme thermique ont été sélectionnés en fonction de la meilleure absorbance et du bruit de fond le plus faible, et sont résumés dans le Tableau 14.

**Tableau 14. Programme thermique du four pour le dosage du Nickel.**

Etapes	Nom	Température (°C)	Rampe (°C/s)	Hold (s)	Temps (s)
1	Séchage	80	6	20	28,2
2	Séchage	90	3	20	23,3
3	Séchage	110	5	10	14
4	Pyrolyse	350	50	20	24,8
5	Pyrolyse	1050	300	10	12,3
6	Adaptation	1050	0	5	5,0
7	Atomisation	2300	1500	5	5,8
8	Nettoyage	2450	500	4	4,3

### B. Procédure de validation analytique

La clause 5.4.5.1 de la norme ISO 17025 : 2005 définit ainsi la validation : « *La validation est la confirmation par examen et apport de preuves objectives du fait que les exigences particulières en vue d'une utilisation prévue déterminée sont remplies* » [248].

La procédure de validation analytique a été réalisée avant d'effectuer le dosage des métaux dans les différentes matrices en suivant les recommandations de la commission de la Société Française des Sciences et Techniques Pharmaceutiques (SFSTP 2003-2006) [249-252].

Lors de notre étude, onze procédures de validations ont été effectuées au total :

- Validation analytique de dosage du Plomb dans le sol ;
- Validation analytique de dosage du Plomb dans l'eau ;
- Validation analytique de dosage du Plomb dans les plantes ;
- Validation analytique de dosage du Plomb dans le lait ;
- Validation analytique de dosage du Cadmium dans le sol ;
- Validation analytique de dosage du Cadmium dans l'eau ;
- Validation analytique de dosage du Cadmium dans les plantes ;
- Validation analytique de dosage du Cadmium dans le lait ;
- Validation analytique de dosage du Nickel dans le sol ;
- Validation analytique de dosage du Nickel dans l'eau ;
- Validation analytique de dosage du Nickel dans le lait.

La Figure 16 illustre le processus suggéré dans le protocole de validation SFSTP 2003-2006 pour choisir un protocole expérimental de validation en tenant compte des contraintes ou des spécificités associées à la procédure de dosage à valider [249-252].

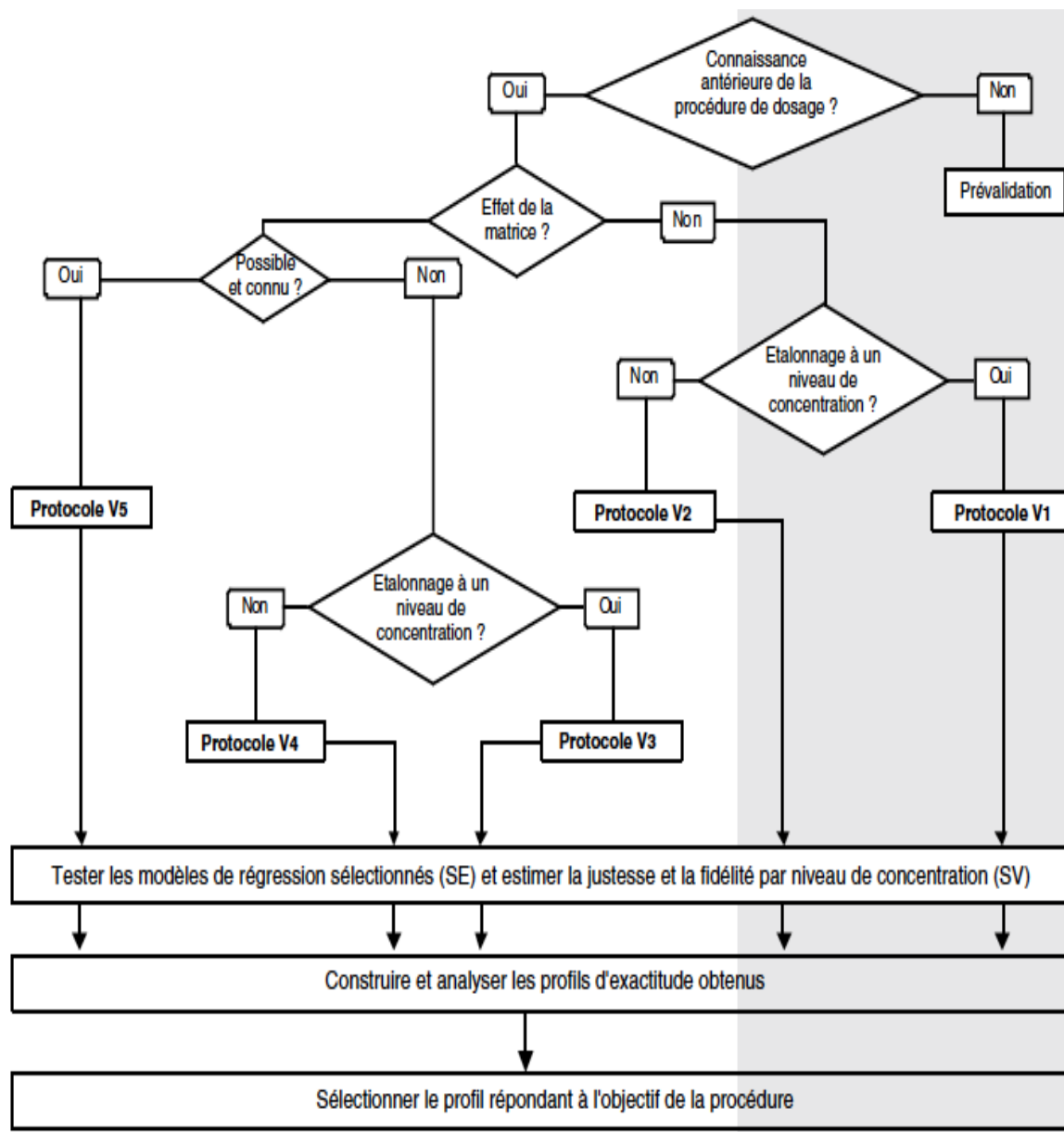


Figure 16. Logigramme permettant de sélectionner un protocole de validation [249-252].

Dans notre étude, nous avons choisi le protocole de « validation analytique V5 » selon le logigramme illustré dans la Figure 16, justifié par la présence d'un effet matrice possible.

Donc le nombre minimum de séries est de trois avec un nombre total d'essais de 28 comme illustré dans le Tableau 15. Il est important d'insister sur le fait qu'il s'agit de protocoles minimaux construits en fonction de contraintes réglementaires.

**Tableau 15. Choix non exhaustif du nombre de standards d'étalonnage et de validation en fonction du protocole choisi [249-252].**

Standards	Protocole				
	V1	V2	V3	V4	V5
Série étalonnage sans la matrice	LD	Bas (80%)	LD	LD	
	LQ	Médian	LQ	LQ	
	3LQ	(100%)	3LQ	3LQ	
	C <sub>max</sub>	Haut (120%)	Médian C <sub>max</sub>		
Série étalonnage avec la matrice		Bas (80%)	LD	LD	LD
		Médian	LQ	LQ	LQ
		(100%)	3LQ	3LQ	Médian
		Haut (120%)	Médian C <sub>max</sub>		0,85 C <sub>max</sub> C <sub>max</sub>
<b>Nombre minimum de séries</b>	2	2	2	2	2
<b>Nombre total d'expérimentations (minimum)</b>	20	24	40	32	28

Pour chaque procédure de validation analytique, le protocole suivant a été déterminé :

#### - Plan de validation

Le plan d'expérience de validation sert à estimer, dans les conditions où le mode opératoire sera appliqué en routine, les performances de la méthode. Celui-ci devra définir le nombre de séries et d'essais par série. Le nombre minimum de séries pour la validation a été fixé à 3 séries, en considérant qu'une série équivaut à un jour avec 3 essais par série. Les concentrations des solutions étalons de la gamme d'étalonnage ont été choisies pour couvrir un domaine large de concentrations pouvant inclure les valeurs des analytes dans les échantillons.

**- Domaine de validation**

Le domaine de validation est caractérisé par la gamme de concentrations où la méthode peut être valide, par les caractéristiques de la technique analytique ainsi que les objectifs du travail. Selon la matrice et le métal analysé, une plage de concentrations a été choisie.

Le modèle de réponse choisi est linéaire. La validité de la courbe d'étalonnage a été évaluée sur la correspondance entre la valeur mesurée et la valeur théorique de chaque niveau d'étalonnage sur la base d'un écart maximum de 10%.

**- La spécificité**

En fonction de la technique analytique, la spécificité d'une méthode peut être appréciée sur base du temps de rétention, de la spécificité avec un réactif, ou d'un spectre ultraviolet. Définir la spécificité, dans le contexte des méthodes spectrométriques, implique la sélection précise de la longueur d'onde de résonance de l'élément à doser, tout en comparant les résultats avec le blanc matrice (les longueurs d'onde choisies sont de 217,05nm, 228,80nm et 232,00nm pour le Plomb, le Cadmium et le Nickel, respectivement).

**- La linéarité**

La linéarité de la méthode est vérifiée sur l'intervalle de validation, en utilisant les données des répétitions moyennes de chaque niveau de concentration, pour les trois séries de validation. La linéarité est, dans un premier temps, évaluée par comparaison visuelle des représentations graphiques des réponses instrumentales Y en fonction des concentrations introduites X. La courbe de calibration a été obtenue sur des jours consécutifs avec une concentration standard spécifiée du métal. À partir de la régression linéaire et de la méthode de corrélation, les valeurs de la pente et du  $r^2$  ont été calculées.

**- La justesse**

La justesse exprime l'étroitesse de l'accord entre la valeur moyenne obtenue à partir d'une série de résultats d'essais et une valeur qui est acceptée comme conventionnellement vrai.

L'écart entre la récupération moyenne de chaque série déterminée expérimentalement et lors de la validation et la valeur théorique doit se situer dans les limites suivantes en fonction des concentrations. Il a été déterminé par le recouvrement.

**- La répétabilité et la reproductibilité intra-laboratoire**

La répétabilité et la reproductibilité intra-laboratoire sont calculées à partir de minimum 3 séries de 3 essais réalisées sur des matrices contenant l'analyte recherché. Pour être dans les conditions de reproductibilité intra-laboratoire, il faut faire varier au moins un paramètre (analyste, jour, appareil...) d'une série à l'autre. Le critère d'évaluation est la vérification du pourcentage de l'écart-type relatif (%RSD) calculé soit inférieur ou égal aux valeurs maximales admissibles.

**- Limite de détection et de quantification**

La limite de détection et la limite de quantification ont été calculées comme étant respectivement 3 fois et 10 fois l'écart-type de dix blancs analytiques (Dix répétitions) divisé par la pente de la courbe d'étalonnage selon les équations suivantes :

$$\text{Limite de Détection (LD)} = (3.s \text{ blanc}) / a \quad (\text{Équation 4})$$

$$\text{Limite de Quantification (LQ)} = (10.s \text{ blanc}) / a \quad (\text{Équation 5})$$

Avec  $s$  blanc = écart-type du blanc analytique ;  $a$  : pente de la droite de régression de la linéarité. (Le blanc analytique est constitué uniquement d'acide nitrique et de peroxyde d'hydrogène traités de la même façon que les échantillons). Une valeur moyenne a été ensuite calculée pour chaque métal et dans chaque matrice.

**C. Contrôle qualité**

Après validation analytique et pour chaque échantillon analysé (lait, sol, plantes, eau), une analyse en triple a été effectuée.

En l'absence de matériaux de référence certifiés (MRC), la justesse des méthodes analytiques a été évaluée en calculant le recouvrement. De ce fait, des concentrations bien déterminées ont été ajoutées aux échantillons et le taux de recouvrement a été calculé selon l'équation 6 (un contrôle effectué après la réalisation de 20 analyses de suite). Pour toutes les concentrations ajoutées, la justesse est confirmée par un taux de recouvrement compris entre 90 et 110 %. Si le recouvrement dépasse la valeur seuil, une nouvelle calibration est effectuée avant de passer de nouveaux échantillons.

$$\text{Recouvrement (\%)} = \frac{\text{Concentration trouvée} - \text{concentration ajoutée}}{\text{concentration ajoutée}} \quad (\text{Équation 6})$$

Les produits chimiques et les réactifs utilisés (étalons des métaux, HCl et HNO<sub>3</sub>) étaient de qualité analytique et de marque Sigma-Aldrich® et Merck®.

Les concentrations massiques en élément métallique (Pb, Cd, Ni) dans les échantillons analysés ont été exprimées en µg/Kg selon l'équation suivante :

$$\text{Elément métallique (}\mu\text{g/Kg)} = (\text{C.V.F}) / \text{Pe} \quad (\text{Équation 7})$$

Avec C : concentration de l'élément métallique mesurée (µg/l) ; V : volume de dilution de l'échantillon en litre ; F : facteur de dilution ; Pe : prise d'essai de l'échantillon exprimé en Kg.

### I.1.9. Dosage du Mercure dans l'eau d'abreuvement et le lait

En dépit du fait que le Mercure ne soit pas inclus parmi les objectifs initiaux du travail, son dosage s'explique par des raisons analytiques (présence de l'automate de dosage et méthode analytique déjà validée) et toxicologiques (propriétés toxiques et persistance dans l'environnement, fréquemment étudié les produits alimentaires).

Ainsi, son dosage complémentaire dans cette étude vise à enrichir la compréhension des risques potentiels pour la santé liés à l'exposition aux métaux lourds dans le lait de chamelle.

Le Mercure a été déterminé dans le lait et l'eau d'abreuvement à l'aide d'un analyseur de Mercure/hydrure par spectrophotométrie d'absorption atomique à vapeur froide (Mercurr, Analytikjena®), équipé d'une lampe à Mercure à cathode creuse fonctionnant à une longueur d'onde de 253,7nm (Figure 17).

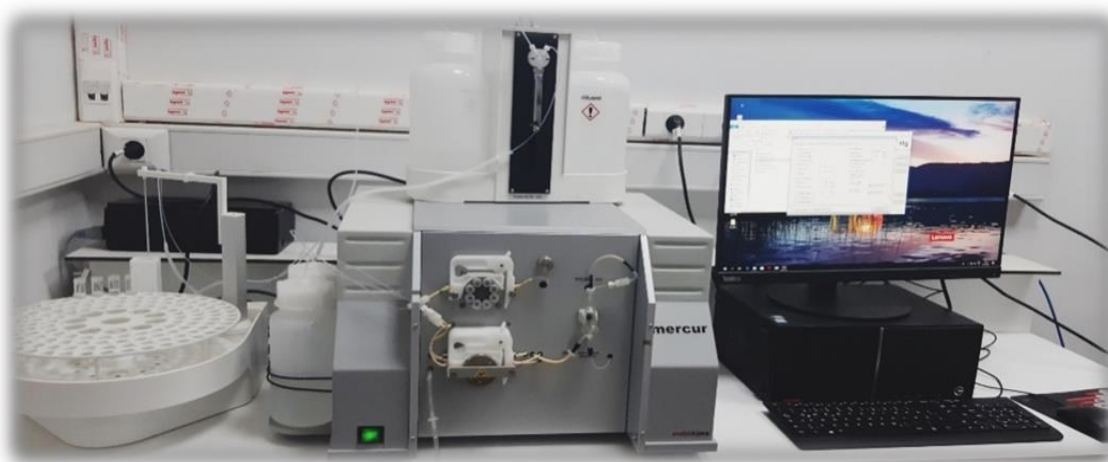
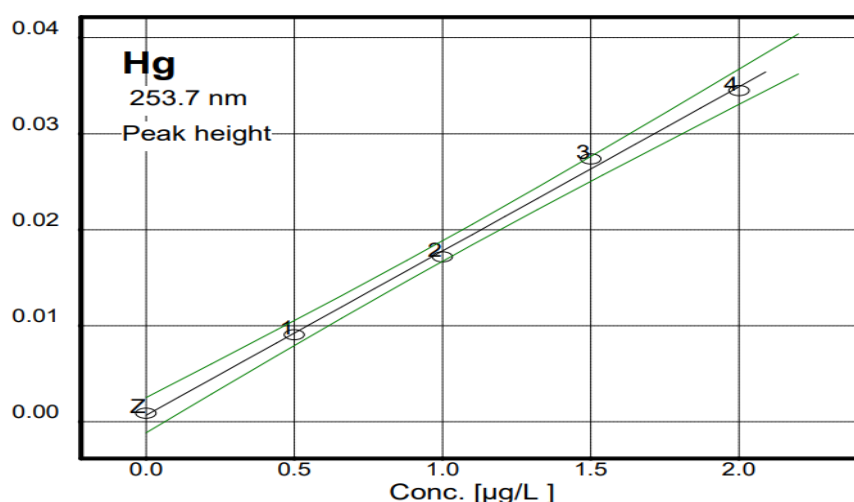


Figure 17. Automate Mercurr® pour le dosage du Mercure dans le lait.



Dans notre étude, le dosage du Mercure dans le lait et l'eau d'abreuvement a été réalisé en utilisant une méthode qui avait déjà été validée par les ingénieurs du laboratoire du CRAPC-Ouargla. Étant donné que le laboratoire a déjà démontré la validité et la fiabilité de la méthode, il a été jugé raisonnable de se baser sur ces résultats pour cette étude.

La Figure 18 illustre la courbe de calibration du Mercure pour l'eau d'abreuvement qui a été calibrée dans une concentration allant de 0,5 à 2 µg/l. Les échantillons ont été analysés en triple et un contrôle a été passé en parallèle afin d'assurer la véracité des résultats obtenus.



**Figure 18. Courbe de calibration du Mercure pour le dosage de l'eau d'abreuvement.**

Les résultats des tests de performance de la technique sont présentés de manière détaillée dans le Tableau 16, mettant en évidence la fiabilité et la robustesse des méthodes utilisées.

**Tableau 16. Résultats des tests de performance du dosage du Mercure dans l'eau et dans le lait.**

Critères de Validation	Eau	Lait
<b>Linéarité</b>	[0,50-2,00] µg/l	[0,50-3,00] µg/Kg
	Ordonnée à l'origine (b) : 0,00068	Ordonnée à l'origine (b) : -0,000019
	Pente (a) : 0,017105	Pente (a) : 0,008189
	Coefficient de détermination : 0,9955	Coefficient de détermination : 0,9954
<b>Limite de détection</b>	0,01710 µg/l	0,00819 µg/Kg
<b>Limite de quantification</b>	0,04355 µg/l	0,06703 µg/Kg
<b>RSD de répétabilité (%)</b>	5,80	12,72
<b>Présence d'effet matrice</b>	Non	Supposée

### I.1.10. Paramètres physico-chimiques de l'eau d'abreuvement et du lait

#### A. Analyses physico-chimiques de l'eau d'abreuvement

##### a. Mesure du pH

Le pH de l'eau a été déterminé par une méthode potentiométrique à l'aide d'un pH-mètre de la marque Ohaus® (Starter 5000). Les mesures ont été précédées d'une étape d'étalonnage à l'aide de deux solutions tampons (pH 4 et pH 7).

##### b. Conductivité et salinité

La conductivité électrique est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1cm<sup>2</sup> de surface et séparées l'une de l'autre de 1cm. La salinité correspond à la masse de sels contenue dans d'eau analysée. Dans notre étude, ces deux paramètres ont été mesurés par le conductimètre Ohaus® (Starter 300C).

##### c. Turbidité

La turbidité de l'eau a pour origine la présence de matières en suspension (argile, particules fibreuses ou organiques, micro-organismes...) et est exprimée en unités correspondant à une mesure optique du passage de lumière. Pour notre étude, elle a été réalisée à l'aide d'un turbidimètre de la marque HACH® (TL2360) à cellule photo-électrique, par la méthode néphélométrique. Le Tableau 17 montre la classification de la turbidité de l'eau.

**Tableau 17. Classification de la turbidité de l'eau.**

Valeur	Type d'eau
NTU < 5	Eau claire
5 < NTU < 50	Eau légèrement trouble
NTU > 50	Eau trouble

#### B. Analyses physico-chimiques du lait

##### a. Détermination du pH

La valeur du pH a une importance exceptionnelle par l'abondance des indications quelle donne sur la richesse du lait en certains de ses constituants et sur sa stabilité. Le pH a été déterminé par la méthode potentiométrique à l'aide d'un pH-mètre.

### b. Détermination la teneur en protéines

Le taux des protéines (protéines totales) dans le lait de chamelle a été dosé par l'emploi de méthode colorimétrique de Lowry (1951). Le principe est basé sur l'obtention d'un composé chromogène par une réaction d'oxydoréduction qui donne à un complexe coloré : le bleu de molybdène (couleur bleu foncé) dont l'intensité est mesurée à 750nm.

### I.1.11. Analyse de la contamination métallique et de ses implications

#### A. Calcul de l'index de géoaccumulation du sol

Un des critères pour évaluer l'intensité de la pollution métallique du sol est l'index de géoaccumulation (Igeo). L'Igeo permet d'estimer la contamination des métaux en comparant la concentration du métal avec la valeur de fond géologique dans la zone d'étude. Cette méthode de calcul a été utilisée depuis la fin des années 1960 et a été appliquée à plusieurs études à travers le monde [253-255].

Elle est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1.5 B_n) \quad (\text{Équation 8})$$

Où Igeo, Index de géoaccumulation ;  $\log_2$ , logarithme de base 2 ; n, élément considéré ;  $C_n$  est la concentration de métaux examinés dans des échantillons de sol ;  $B_n$  est la concentration de fond géochimique du métal (n) ; 1.5 est le facteur d'exagération du fond géochimique, dont la fonction est de prendre en compte les fluctuations naturelles du fond géochimique.

En outre, six classes d'index de géoaccumulation sont définies selon le degré de pollution. Ils sont reportés dans le Tableau 18.

**Tableau 18. Classification de l'intensité de pollution en fonction de l'index de géoaccumulation [240].**

Valeur de l'index (Igeo)	Classes Igeo	Intensité de la pollution
$I_{geo} > 5$	6	Contamination extrême
$4 > I_{geo} > 5$	5	Forte à extrême contamination
$3 > I_{geo} > 4$	4	Forte contamination
$2 > I_{geo} > 3$	3	Contamination modérée à forte
$1 > I_{geo} > 2$	2	Contamination modérée
$0 > I_{geo} > 1$	1	Sans à légère contamination
$0 > I_{geo}$	0	Sans contamination

### B. Calcul du facteur de transfert des métaux entre les matrices

Selon plusieurs auteurs, les métaux peuvent atteindre l'organisme humain par un triple transfert : du sol aux plantes, des plantes au lait et du lait à l'homme [256,257]. Les facteurs de transfert (FT) quantifient le transfert de métaux entre deux niveaux consécutifs de la chaîne alimentaire, à savoir sol-plantes, plantes-lait et lait-humain [258].

Pour calculer les facteurs de transfert, les hypothèses suivantes ont été choisies :

- Les animaux ont été exposés uniquement aux plantes aux alentours des élevages avec des teneurs en métaux relativement constantes pendant de longues périodes de temps ;
- L'alimentation était basée principalement sur les plantes ;
- Les taux d'absorption et d'excrétion étaient proportionnels à la concentration du contaminant.

Les facteurs de transfert sol-plantes du Plomb et du Cadmium ( $FT_{sp}$ ), qui indiquent l'absorption de métaux du sol par les plantes, ont été calculés selon l'équation 8 [259]. Les facteurs de transfert plantes-lait ( $FT_{pl}$ ) ont été calculés selon l'équation 9 [260].

$$FT_{sp} = \frac{C_p}{C_s} \quad (\text{Équation 9})$$

où  $C_p$  est la teneur en métal des plantes (mg/Kg), et  $C_s$  est la teneur en métal du sol (mg/Kg).

$$FT_{pl} = \frac{C_l}{C_p} \quad (\text{Équation 10})$$

où  $C_l$  est la teneur en métal du lait (mg/Kg), et  $C_p$  est la teneur en métal du fourrage (mg/Kg).

### C. Calcul du risque sanitaire

L'évaluation des risques pour la santé humaine est un processus destiné à estimer le risque pour un organisme, un système ou une (sous-)population cible donnée, à la suite d'une exposition à un agent particulier, en tenant compte des caractéristiques inhérentes de l'agent ainsi que les caractéristiques du système cible spécifique [261].

En règle générale, l'évaluation des risques comprend quatre étapes : l'identification des dangers, la caractérisation des dangers, l'évaluation de l'exposition et la caractérisation des risques [261].

En complétant ces processus d'évaluation des risques, les dangers associés aux aliments sont évalués et les risques potentiels tels que les risques cancérigènes et non cancérigènes pour la population sont estimés, ce qui facilite la formulation de mesures de gestion des risques appropriées pour protéger la santé publique [168].

#### **a. Dose journalière d'exposition**

L'évaluation des risques sanitaires non cancérigènes associés à l'exposition au Plomb, au Cadmium, au Nickel et au Mercure par le biais de la consommation de lait de chamelle a été effectuée en utilisant la méthode préconisée par l'US-EPA, qui repose sur le quotient de danger (HQ), défini comme le rapport entre la dose estimée d'un contaminant et une dose de référence [182].

Dans un premier temps, le calcul de la dose journalière d'exposition (Estimated Daily Intake, EDI) a été entrepris. Pour ce faire, l'évaluation a été effectuée chez les adultes et les enfants en estimant les doses d'exposition aux métaux résultant de la consommation de lait, exprimées en termes de dose journalière estimée (EDI).

Ce calcul est basé sur l'Equation 01, telle qu'évoquée dans le chapitre dédié à la revue systématique (Page 41).

#### **b. Quotient de risque non cancérigène**

Le quotient de danger (HQ) est défini comme le rapport entre la dose journalière estimée d'un contaminant et la dose de référence, conformément à l'équation 02, exposée dans la section dédiée du chapitre de la revue systématique (Page 41).

#### **c. Indice de danger**

Le risque pour la santé résultant d'une exposition simultanée à différents métaux a été évalué par l'indice de danger (HI, Hazard index) calculé comme la somme des quotients de risques de chaque métal (Pb, Cd, Ni, Hg).

Cette évaluation est basée sur l'hypothèse que l'exposition simultanée aux contaminants pourrait avoir des effets additifs et/ou interactifs [262]. Le calcul de l'indice de danger est basé sur l'équation 11.

$$HI = \sum HQ(n) = HQ(Pb) + HQ(Cd) + HQ(Hg) + HQ(Ni) \text{ (Équation 11)}$$

Ou (n) représente les différents métaux étudiés.

Dans le cas où  $HI < 1$ , la consommation de lait est sans danger, tandis que dans le cas de  $HI > 1$ , la consommation peut présenter un risque pour la santé.

#### d. Risque cancérigène

La probabilité qu'un individu développe un cancer au cours de sa vie en raison de la consommation de lait contaminé a été évaluée à l'aide du risque cancérigène (RC). Le calcul du RC a été effectué spécifiquement pour le Plomb et le Cadmium en utilisant l'équation (3), présentée précédemment dans la section dédiée de la revue systématique (Page 42).

Le risque cancérigène total (RCT) a quant à lui été déterminé en additionnant les risques cancérigènes (RC) spécifiques pour le Cadmium et le Plomb, en considérant leurs effets comme additifs, selon l'équation 11.

$$RCT = \sum RC(n) = RC(Pb) + RC(Cd) \quad (\text{Équation 12})$$

#### I.1.12. Analyses statistiques

Les données ont été saisies sur Excel 2021 et traitées statistiquement en utilisant le logiciel XLSTAT® (Addinsoft. Statistical and data analysis solution) [263]. Pour chaque métal, nous avons réalisé des statistiques descriptives avec le calcul de la moyenne arithmétique, de l'écart-type, du minimum et du maximum et de la médiane. La normalité de la distribution des variables quantitative a été évaluée par le test de Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk.

Le Tableau 19 présente les variables quantitatives étudiées et leur classification selon la distribution Normale ou non Normale.

**Tableau 19. Variables quantitatives étudiées et leur classification selon la distribution Normale ou non Normale.**

Distribution Normale	Distribution non Normale
Plomb dans l'eau	Plomb dans le lait
Nickel dans le lait	Plomb dans le sol
Nickel dans le sol	Plomb dans les plantes
Mercure dans le lait	Cadmium dans l'eau
	Cadmium dans le lait
	Cadmium dans les plantes
	Nickel et Mercure dans l'eau

De plus, pour chaque élément et chaque matrice (lait, eau d'abreuvement, sol et plantes), une étude comparative a été réalisée en fonction de la saison et de la localisation des élevages à l'aide de tests paramétriques et non paramétriques :

- Les tests paramétriques, utilisés lorsque les données étaient normalement distribuées et que les conditions d'homogénéité de la variance étaient respectées, comprenaient l'analyse de la variance à un facteur (ANOVA) et le test t de Student.
- Les tests non paramétriques comprenaient le test de Kruskal-Wallis, le test de Wilcoxon et le test de Mann-Whitney. Ces tests ont été utilisés lorsque les données ne suivaient pas une distribution normale ou que les conditions d'homogénéité de la variance n'étaient pas respectées.

Les relations entre les métaux dans les différentes matrices (sol, eau d'abreuvement, plantes et lait) ainsi que la relation entre ces matrices (source de contamination du lait de chamelle) ont été évaluées à l'aide du test de corrélation de Pearson, de Spearman et de Kendall (selon la distribution de normalité), ainsi que l'Analyse en Composantes Principales (ACP) qui a permis de schématiser les données sous forme de graphiques [264].

Un niveau de signification de 5% (0,05) a été adopté pour tous les tests statistiques utilisés dans cette étude. En utilisant un niveau de signification standardisé, nous avons pu assurer que nos conclusions sont valables et qu'elles peuvent être comparées avec celles d'autres études similaires.

Enfin pour garantir de bons calculs statistiques, toute concentration de métal inférieure à la limite de quantification a été traitée en utilisant la valeur de la limite de quantification. Cette approche a été choisie pour assurer une gestion adéquate des concentrations limites, en garantissant la représentativité des résultats tout en prenant en compte les limitations analytiques inhérentes à la détection des métaux à de faibles niveaux dans les échantillons.

### **I.1.13. Considération éthique**

L'étude a été menée avec des matériaux inertes, donc aucune considération éthique n'était nécessaire, car il n'y avait aucune manipulation d'animaux vivants à des fins expérimentales.

## I.2. Matériel

### I.2.1. Réactifs chimiques

- Solutions mères standards de 1000 mg/l de Nickel (Merck), de Cadmium (Merck), de Mercure (Perkin Elmer) et de Plomb (Merck) dans 2-5% d'acide nitrique ;
- Acide chlorhydrique ultra pur HCl (37% g/g) ;
- Acide Nitrique supra pur à 69% (HNO<sub>3</sub>) ;
- Eau oxygénée (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 30%) ;
- Dihydrogénophosphate d'ammonium (Merck) ;
- Eau ultra pure ;
- Gaz argon pur à 99,99% ;
- Préparation de solution fille à 10 mg/L : nous avons préparé des solutions filles à 10 mg/l, par dilution au 1/100ème de la solution mère de Plomb, Cadmium, Nickel et Mercure.

### I.2.2. Appareillage

- Le tamisage des échantillons solides (sol) a été réalisé grâce au tamiseur de laboratoire Retsch - AS 200 Basic ;
- Le broyage des échantillons solides (plante) a été réalisé par le Broyeur à billes planétaire Pulverisett ;
- Le pH des solutions aqueuses a été mesuré directement en utilisant un pH-mètre de la marque OHAUS (STARTER5000) ;
- Étuve ventilée thermostatée ;
- Centrifugeuse de paillasse ;
- La conductivité a été mesurée par le conductimètre OHAUS (STARTER300C) ;
- La turbidité a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre de la marque HACH (TL2360) à cellule photo-électrique, par la méthode néphélométrique ;
- Distillateur à osmose inversé (ELGA) ;
- Micropipettes à volume réglable, Eppendorf ;
- Tubes en verre, bouchons, embouts ;
- La minéralisation des échantillons a été réalisée par le four à micro-ondes « Topwave de la marque Analytik Jena » ;



- La détermination de la concentration du Plomb, du Cadmium et du Nickel a été réalisée par l'analyseur spectromètre d'absorption atomique avec four à graphite « ContrAA 800D de la marque Analytik Jena », piloté par micro-ordinateur équipé d'un passeur d'échantillons, d'un correcteur de fond non spécifique et d'une lampe multi-élémentaire ;
- La détermination de la concentration du Mercure a été réalisée par l'analyseur spectromètre d'absorption atomique à vapeur froide « Mercur de la marque Analytik Jena ».

Chapitre II

Résultats

Dans le cadre de cette étude, un total de 120 échantillons de lait de chamelle cru, 40 échantillons d'eau d'abreuvement, 40 échantillons de sol et 40 échantillons de plantes ont été collectés auprès de dix élevages soigneusement sélectionnés. Cette collecte a été effectuée de manière étalée sur quatre campagnes distinctes, se déroulant en janvier, mars, juin et septembre 2021. Chacune de ces campagnes comprenait la récolte de 30 échantillons de lait et 10 échantillons d'eau, de sol et de végétation. La section suivante vise à présenter les principaux résultats des différentes techniques et analyses effectuées dans ce travail.

## II.1. Validation analytique des méthodes de dosage des métaux

### II.1.1. Validation analytique du dosage du Plomb

#### A. Validation du dosage du Plomb dans le sol

##### a. Série d'étalonnage

Le Tableau 20 montre les résultats bruts des séries d'étalonnage sur trois jours pour le Plomb au niveau de la matrice du sol. Les concentrations 5, 10, 25, 30 et 50mg/Kg ont été choisies. La linéarité des droites est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,9985.

**Tableau 20. Séries d'étalonnage du Plomb dans le sol sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C%	C théorique (mg/Kg)	Réponses	Réponses	Réponses
16,67%	5	0,0979	0,0914	0,1034
33,34%	10	0,1755	0,1410	0,1671
83,34%	25	0,3345	0,3301	0,3485
100%	30	0,3983	0,3660	0,3865
166,67%	50	0,6585	0,6370	0,6435
<b>Pente</b>	<b>a</b>	0,0122	0,0121	0,0119
<b>Ordonnée à l'origine</b>	<b>b</b>	0,0395	0,0226	0,0446
<b>Coefficient de détermination</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0,9977	0,9969	0,9983

##### b. La justesse

Les données ayant servi pour le calcul des recouvrements des trois jours sont résumées dans le Tableau 21. Le recouvrement moyen est égal à 101%, ce qui est conforme aux exigences de la validation des procédures d'analyses.

Tableau 21. Calcul des recouvrements pour la validation du Plomb dans le sol.

Niveau	C (mg/Kg)	Répétitio n	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
16,67%	5	1	93,06	117,37	89,26	<b>102,78</b>
		2	85,11	117,76	97,84	
		3	108,52	106,70	109,83	
33,34%	10	1	104,28	98,80	104,10	<b>104,07</b>
		2	111,25	97,33	87,22	
		3	118,10	97,49	118,04	
83,34%	25	1	96,87	102,21	102,93	<b>100,14</b>
		2	104,86	99,44	109,50	
		3	87,78	103,16	94,48	
100%	30	1	93,11	87,85	98,68	<b>96,09</b>
		2	104,48	98,61	94,23	
		3	95,87	97,19	94,81	
166,67 %	50	1	107,40	99,85	95,54	<b>101,90</b>
		2	104,32	94,34	107,05	
		3	98,50	110,30	99,77	

### c. Construction du profil d'exactitude

Les résultats montrent que la méthode est fidèle pour chaque niveau de concentration, avec des coefficients de variation de fidélité intermédiaire ne dépassant pas 15% (Tableau 22).

Tableau 22. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans le sol.

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Concentration introduite (mg/Kg)	5,000	10,000	25,000	30,000	50,000
Concentration calculée (mg/Kg)	5,130	10,386	24,986	28,769	50,485
Biais absolu (mg/Kg)	0,130	0,386	- 0,014	- 1,231	0,485
Biais relatif (%)	2,60	3,86	- 0,06	- 4,10	0,97
<b>RSD de répétabilité (%)</b>	<b>12,66</b>	<b>9,42</b>	<b>5,87</b>	<b>4,49</b>	<b>5,55</b>
<b>RSD de précision intermédiaire</b>	<b>12,66</b>	<b>9,90</b>	<b>6,75</b>	<b>4,77</b>	<b>5,55</b>
Limite de tolérance 60% inférieure	- 9,60	- 5,93	- 6,64	- 8,47	- 4,30
Limite de tolérance 60% supérieure	14,80	13,65	6,53	0,27	6,24

Le profil d'exactitude est représenté graphiquement avec en abscisse les niveaux de concentration étudiés, en ordonnée le biais relatif (%), et en y reportant le biais relatif moyen par niveau de concentration ainsi que les limites d'acceptabilité de la méthode. Les limites inférieure et supérieure de l'intervalle de tolérance sont incluses dans la limite d'acceptabilité fixée à  $\pm 15\%$  et sont représentées dans la Figure 19.

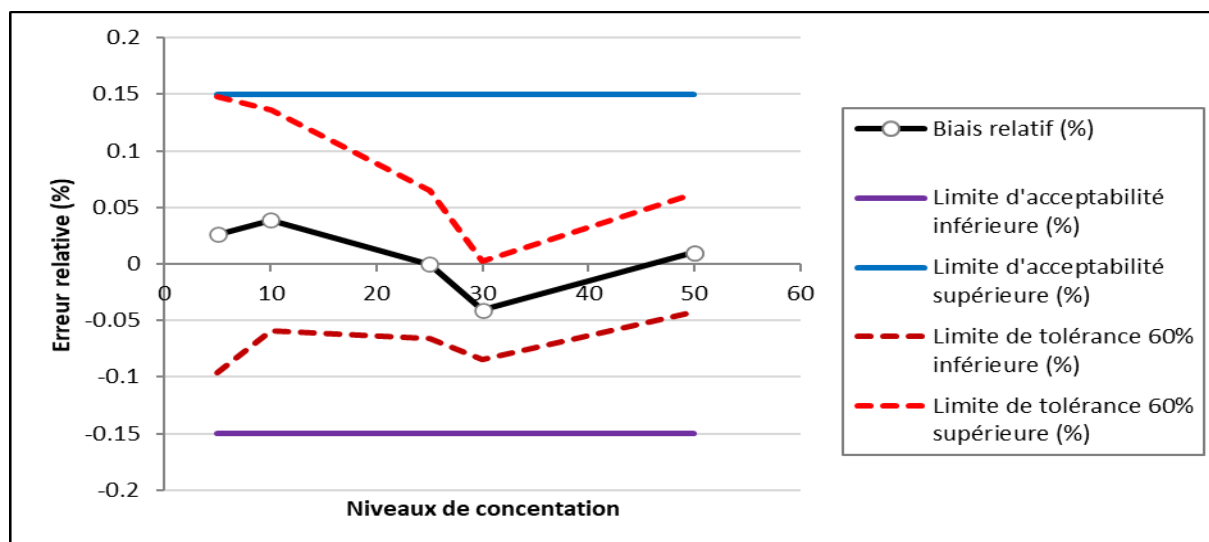


Figure 19. Profil d'exactitude du profil de validation du dosage du Plomb dans le sol.

#### d. Limite de détection et de quantification

Le Tableau 23 résume les informations concernant les limites de détection et de quantification pour le dosage du Plomb dans le sol. La méthode analytique du dosage du Plomb dans le sol est validée pour les limites d'acceptation définies (Probabilité 60% ; Limite d'acceptabilité 15%) et sur les intervalles de [5-50]mg/Kg avec une LD de 0,54mg/Kg et une LQ de 1,80mg/Kg.

Tableau 23. Limites de détection et de quantification du Plomb dans le sol.

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,0153	0,0188	0,0200	
Blanc 2	0,0174	0,0143	0,0142	
Blanc 3	0,0163	0,0148	0,0153	
SD Blanc	0,0010	0,0024	0,0030	
Limite de Détection (mg/Kg)	0,2483	0,6069	0,7733	<b>0,5428</b>
Limite de Quantification (mg/Kg)	0,8278	2,0230	2,5778	<b>1,8096</b>

## B. Validation du dosage du Plomb dans l'eau

### a. Série d'étalonnage

Le Tableau 24 montre les résultats bruts des séries d'étalonnage sur trois jours pour le Plomb au niveau de l'eau. Pour le plan de validation, le nombre de niveaux de concentration choisi est de 4 : 16,67%, 83,33%, 100% et 166,67%. Soit des concentrations de 5, 25, 30 et 50 µg/l. La linéarité est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,9978.

**Tableau 24. Séries d'étalonnage du Plomb dans le l'eau sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C%	C théorique (µg/l)	Réponses	Réponses	Réponses
16,67%	5	0,0652	0,0609	0,0689
83,34%	25	0,2235	0,2201	0,2324
100%	30	0,2659	0,2440	0,2577
166,67%	50	0,4390	0,4247	0,4290
<b>Pente</b>	<b>a</b>	0,0082	0,0081	0,0079
<b>Ordonnée à l'origine</b>	<b>b</b>	0,0260	0,0152	0,0297
<b>Coefficient de détermination</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0,9981	0,9969	0,9983

### b. La justesse

Les données ayant servi pour le calcul des recouvrements des trois jours sont résumées dans le Tableau 25. Le recouvrement moyen est égal à 100,96%, ce qui est conforme aux exigences de la validation des procédures d'analyses.

**Tableau 25. Calcul des recouvrements pour la validation du Plomb dans l'eau.**

Niveau	Concentration (µg/l)	Répétition	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
16,67%	5	1	93,59	116,17	91,79	<b>99,21</b>
		2	88,33	118,05	87,75	
		3	109,03	103,58	84,60	
83,34%	25	1	98,87	102,62	92,83	<b>98,72</b>
		2	104,88	94,40	107,98	
		3	87,77	102,58	96,55	
100%	30	1	92,71	88,61	94,47	<b>95,04</b>
		2	104,47	94,41	90,02	
		3	95,91	100,00	94,80	
166,67%	50	1	105,52	99,55	98,06	<b>101,94</b>
		2	104,00	94,05	104,51	
		3	98,19	110,51	103,04	

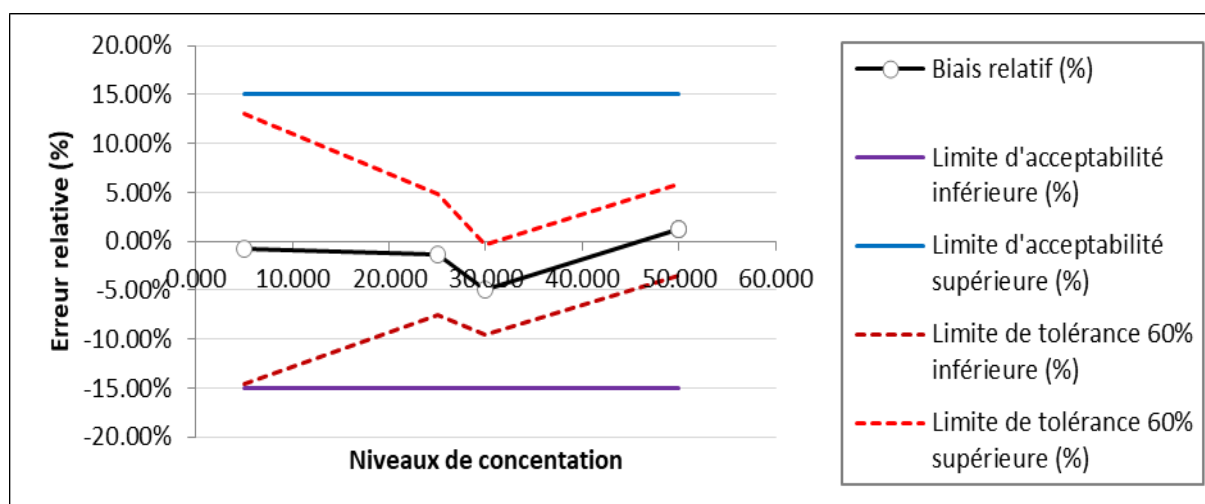
### c. Construction du profil d'exactitude

Les résultats de l'analyse statistique montrent que la méthode est fidèle pour chaque niveau de concentration, avec des coefficients de variation de fidélité intermédiaire ne dépassant pas 15% (Tableau 26).

**Tableau 26. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans l'eau.**

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Concentration moyenne introduite ( $\mu\text{g/l}$ )	5,000	25,000	30,000	50,000
Concentration moyenne calculée ( $\mu\text{g/l}$ )	4,961	24,680	28,513	50,616
Biais absolu ( $\mu\text{g/l}$ )	-0,039	-0,320	-1,487	0,616
Biais relatif (%)	-0,79	-1,28	-4,96	1,23
<b>RSD de répétabilité (%)</b>	<b>14,83</b>	<b>6,68</b>	<b>5,13</b>	<b>4,90</b>
<b>RSD de précision intermédiaire (%)</b>	<b>14,83</b>	<b>6,68</b>	<b>5,13</b>	<b>4,90</b>
Limite de tolérance 60% inférieure	-14,60	-7,47	-9,54	-3,43
Limite de tolérance 60% supérieure	13,02	4,91	-0,37	5,89

Le profil d'exactitude est représenté graphiquement par la Figure 20 avec en abscisse les niveaux de concentration étudiés, en ordonnée le biais relatif (%), et en y reportant le biais relatif moyen par niveau de concentration, les limites de l'intervalle de tolérance ainsi que les limites d'acceptabilité de la méthode.



**Figure 20. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans l'eau.**

#### d. Limite de détection et de quantification

Le Tableau 27 résume les informations concernant les limites de détection et de quantification pour le dosage du Plomb dans l'eau. La méthode analytique est validée pour les limites d'acceptation définies (Probabilité 60% ; Limite d'acceptabilité 15%) et sur les intervalles décrits de [5-50] µg/l avec une LD de 0,21µg/l et une LQ de 0,72µg/l.

**Tableau 27. Limites de détection et de quantification pour le dosage du Plomb dans l'eau.**

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,0163	0,0136	0,0181	
Blanc 2	0,0151	0,0155	0,0165	
Blanc 3	0,0156	0,0154	0,0173	
SD Blanc	0,0004	0,0008	0,0005	
Limite de Détection (µg/l)	0,1445	0,3039	0,2070	<b>0,218</b>
Limite de Quantification (µg/l)	0,4818	1,0130	0,6899	<b>0,728</b>

### C. Validation du dosage du Plomb dans les plantes

#### a. Série d'étalonnage

Pour la validation analytique du dosage du Plomb dans les plantes, nous avons décidé de sélectionner des plantes provenant d'un environnement éloigné de la circulation routière du fait qu'elles sont moins contaminées par les métaux.

Le nombre de niveaux de concentration choisi est de 4 : 16,67%, 33,34%, 100% et 166,67%, soit des concentrations égales à 1, 2, 6 et 10mg/Kg. La linéarité des droites est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,9836 et l'ordonnée à l'origine est comparable à zéro au risque 5% (Tableau 28).



Tableau 28. Séries d'étalonnage du Plomb dans les plantes sur trois jours.

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C %	C théorique (mg/Kg)	Réponses	Réponses	Réponses
16,67%	1	0,0979	0,0937	0,0983
33,34%	2	0,1750	0,1498	0,1813
100%	6	0,3853	0,3531	0,3641
166,67%	10	0,6431	0,6290	0,6390
Pente	a	0,0588	0,0581	0,0574
Ordonnée à l'origine	b	0,0555	0,0412	0,0570
Coefficient de détermination	R <sup>2</sup>	0,9879	0,9812	0,9816

### b. La justesse (biais)

Les données ayant servi pour le calcul des recouvrements des trois jours sont résumées dans le Tableau 29. Le recouvrement moyen est égal à 97,72% ce qui est conforme aux exigences de la validation des procédures d'analyses.

Tableau 29. Calcul des recouvrements pour le Plomb dans les plantes.

Niveau	Concentration (mg/Kg)	Répétition	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
16,67 %	1	1	65,83	91,89	70,52	78,16
		2	64,43	92,11	71,59	
		3	86,05	87,46	73,57	
33,34 %	2	1	93,06	94,16	123,62	101,12
		2	110,98	93,35	82,86	
		3	101,03	92,97	118,01	
83,34 %	6	1	112,31	120,54	109,37	116,73
		2	124,33	118,51	124,49	
		3	110,71	116,18	114,15	
166,67 %	10	1	105,84	101,61	96,82	101,89
		2	106,52	95,91	103,46	
		3	97,10	106,06	103,68	

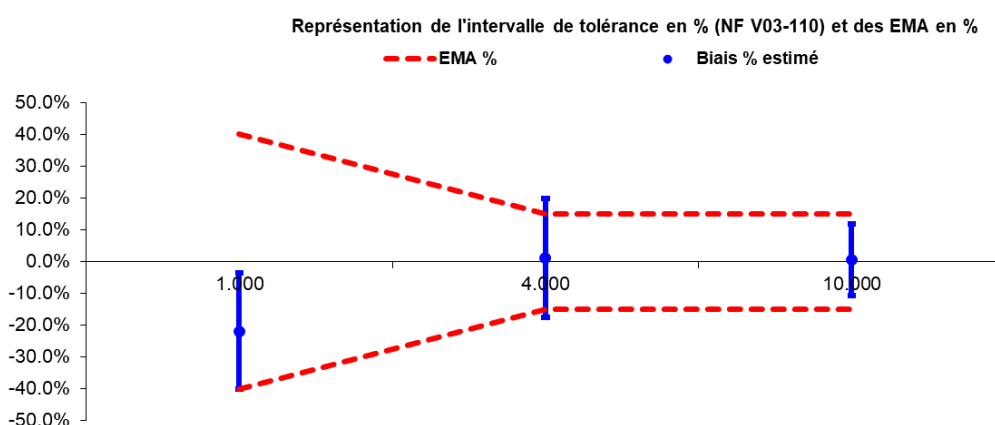
### c. Construction du profil d'exactitude

Les résultats de l'analyse statistique montrent que la méthode est fidèle, avec des coefficients de variation de fidélité intermédiaire ne dépassant pas 15% à l'exception de la concentration minimale (1mg/Kg) (Tableau 30).

**Tableau 30. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans les plantes.**

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Concentration moyenne introduite	1,000	2,000	6,000	10,000
Concentration moyenne calculée	0,782	2,022	5,443	10,084
Biais absolu	-0,218	0,022	-0,557	0,084
Biais relatif (%)	-21,84	1,12	-9,29	0,84
RSD de répétabilité (%)	<b>15,81</b>	<b>14,73</b>	<b>5,57</b>	<b>4,43</b>
RSD de précision intermédiaire (%)	<b>15,81</b>	<b>14,73</b>	<b>5,57</b>	<b>4,43</b>
Limite de tolérance 60% inférieure	-33,44	-12,88	-14,03	-3,35
Limite de tolérance 60% supérieure	-10,24	15,11	-4,55	5,03

Le profil d'exactitude est également représenté graphiquement dans la Figure 21 avec en abscisse les niveaux de concentration étudiés, en ordonnée le biais relatif (%), et en y reportant le biais relatif moyen par niveau de concentration, les limites de l'intervalle de tolérance ainsi que les limites d'acceptabilité de la méthode. Les limites inférieure et supérieure de l'intervalle de tolérance sont incluses dans la limite d'acceptabilité fixée à  $\pm 15\%$ .



**Figure 21. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du plomb dans les plantes.**

**d. Limite de détection et de quantification**

Le Tableau 31 résume les informations concernant les limites de détection et de quantification dans les plantes. La méthode est validée pour les limites d'acceptation définies et sur les intervalles décrits de [2-10] mg/Kg avec une LD de 0,28mg/Kg et une LQ de 0,92mg/Kg.

**Tableau 31. Limites de détection et de quantification du Plomb dans les plantes.**

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,0527	0,0558	0,0808	
Blanc 2	0,0517	0,0525	0,0647	
Blanc 3	0,0563	0,0738	0,0732	
SD Blanc	0,0018	0,0087	0,0055	
Limite de Détection (mg/Kg)	0,0930	0,4515	0,2855	<b>0,277</b>
Limite de Quantification (mg/Kg)	0,3102	1,5049	0,9517	<b>0,922</b>

**D. Validation du dosage du Plomb dans le lait****a. Série d'étalonnage**

Le nombre de niveaux de concentration choisi est de 4 : 20%, 40%, 100% et 120%. Soit des concentrations : 5, 10, 25 et 30µg/Kg. Le Tableau 32 montre les résultats bruts des séries d'étalonnage sur trois jours pour le Plomb dans le lait. La linéarité des droites est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,9953.

**Tableau 32. Séries d'étalonnage du Plomb dans le lait sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C %	C théorique (µg/Kg)	Réponses	Réponses	Réponses
20%	5	0,3080	0,2926	0,2952
40%	10	0,3667	0,3480	0,3515
100%	25	0,4015	0,4113	0,4076
120%	30	0,5267	0,5531	0,5399
Pente	<b>a</b>	0,0085	0,0104	0,0097
Ordonnée à l'origine	<b>b</b>	0,2728	0,2457	0,2457
Coefficient de détermination	<b>R<sup>2</sup></b>	0,9947	0,9962	0,9957

**b. La justesse**

Les données ayant servi pour le calcul des recouvrements des trois jours sont résumées dans le Tableau 33. Le recouvrement moyen est égal à 101,27%, ce qui est conforme aux exigences de la validation des procédures d'analyses.

**Tableau 33. Calcul des recouvrements pour le dosage du Plomb dans le lait.**

Niveau	Concentration (µg/Kg)	Répétition	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
20%	5	1	98,61	104,99	103,53	92,85
		2	93,52	89,07	100,35	
		3	55,97	77,23	112,37	
40%	10	1	101,68	90,46	115,79	106,25
		2	127,08	108,76	102,55	
		3	101,61	96,82	111,51	
100%	25	1	96,25	99,85	107,84	106,23
		2	97,13	111,45	115,34	
		3	108,48	108,14	111,62	
120%	30	1	90,76	99,32	101,21	99,76
		2	96,74	103,02	101,32	
		3	110,09	94,04	101,36	

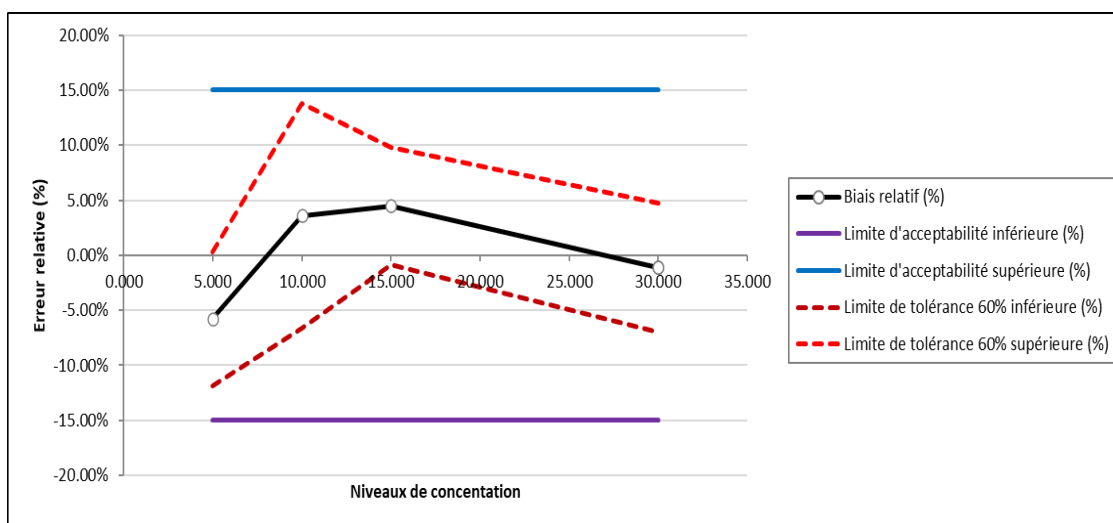
**c. Construction du profil d'exactitude**

Les résultats du Tableau 34 montrent que la méthode est fidèle pour chaque niveau de concentration, avec des coefficients de variation de fidélité ne dépassant pas 15%.

**Tableau 34. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans le lait.**

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Concentration moyenne introduite (µg/Kg)	5,000	10,000	15,000	30,000
Concentration moyenne calculée (µg/Kg)	4,712	10,361	15,671	29,664
Biais absolu (µg/Kg)	-0,288	0,361	0,671	-0,336
Biais relatif (%)	-5,77	3,61%	4,47%	-1,12%
RSD de répétabilité (%)	6,39	10,50%	5,42%	6,35%
RSD de précision intermédiaire (%)	6,77	10,50%	5,46%	6,35%
Limite de tolérance 60% inférieure	-11,86	-6,60%	-0,89%	-7,02%
Limite de tolérance 60% supérieure	0,32	13,82%	9,84%	478%

Le profil d'exactitude est également représenté graphiquement dans la Figure 22. Les limites inférieure et supérieure de l'intervalle de tolérance sont incluses dans la limite fixée à  $\pm 15\%$ .



**Figure 22. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Plomb dans le lait.**

#### d. Limite de détection et de quantification

La méthode analytique est validée pour les limites d'acceptation définies (Probabilité 60% ; Limite d'acceptabilité 15%) et sur les intervalles décrits de [5-30]  $\mu\text{g}/\text{Kg}$  avec une LD de  $0,41\mu\text{g}/\text{Kg}$  et une LQ de  $1,367\mu\text{g}/\text{Kg}$  (Tableau 35).

**Tableau 35. Limites de détection et de quantification du Plomb dans le lait.**

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,014	0,014	0,021	
Blanc 2	0,014	0,016	0,016	
Blanc 3	0,015	0,015	0,017	
SD Blanc	0,000	0,001	0,002	
Limite de Détection ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	0,170	0,300	0,760	<b>0,410</b>
Limite de Quantification ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	0,567	1,000	2,534	<b>1,367</b>

### II.1.2. Validation analytique du dosage du Cadmium

#### A. Validation du dosage du Cadmium dans le sol

##### a. Série d'étalonnage

Le Tableau 36 montre les résultats bruts des séries d'étalonnage sur trois jours pour le Cadmium au niveau de la matrice du sol. Les concentrations choisies sont : 0,2, 0,4, 1,2 et 2,0mg/Kg. La linéarité des droites est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,989.

**Tableau 36. Séries d'étalonnage du Cadmium dans le sol sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C %	C théorique (mg/Kg)	Réponses	Réponses	Réponses
16,67%	0,2	0,0946	0,0911	0,0883
33,34%	0,4	0,1486	0,1243	0,1404
100%	1,2	0,3234	0,2931	0,3022
166,67%	2,0	0,5271	0,5254	0,5237
<b>Pente</b>	<b>a</b>	0,0550	0,0377	0,0458
<b>Ordonnée à l'origine</b>	<b>b</b>	0,0236	0,0239	0,0236
<b>Coefficient de détermination</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0,9936	0,9852	0,9883

##### b. La justesse

Les données ayant servi pour le calcul des recouvrements des trois jours sont résumées dans le Tableau 37. Le recouvrement moyen est égal à 96% ce qui est conforme aux exigences de la validation des procédures d'analyses.

Tableau 37. Calcul des recouvrements pour le dosage du Cadmium dans le sol.

Niveau	Concentration (mg/Kg)	Répétition	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
16,67%	0,2	1	91,65	127,37	74,49	<b>95,34</b>
		2	68,98	106,65	96,79	
		3	91,35	101,96	98,79	
33,34%	0,4	1	97,44	91,43	94,81	<b>96,81</b>
		2	105,37	90,62	85,39	
		3	95,08	90,23	120,95	
100%	1,2	1	88,66	83,16	92,08	<b>91,58</b>
		2	93,82	89,23	87,45	
		3	102,34	95,08	92,42	
166,67 %	2,0	1	107,38	101,87	100,38	<b>102,53</b>
		2	104,08	96,12	100,73	
		3	100,70	108,47	103,08	

### c. Construction du profil d'exactitude

Le profil d'exactitude est représenté graphiquement avec en abscisse les niveaux de concentration étudiés. Les limites inférieure et supérieure de l'intervalle de tolérance sont incluses dans la limite d'acceptabilité fixée à  $\pm 15\%$  (Figure 23).

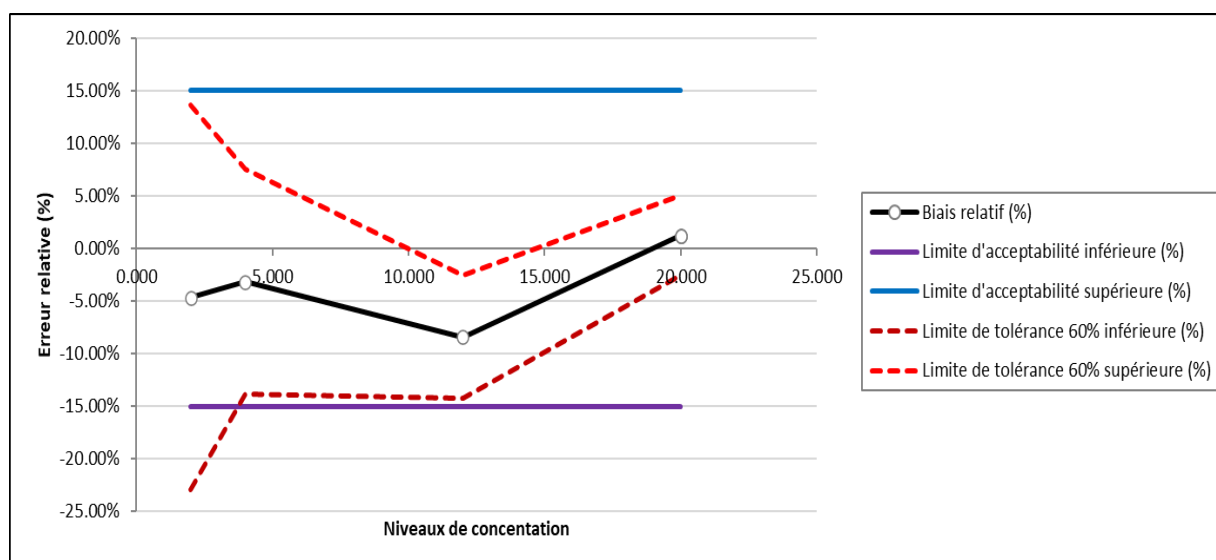


Figure 23. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du cadmium dans le sol.

Les résultats du Tableau 38 montrent que la méthode est fidèle, avec des coefficients de variation de fidélité intermédiaire ne dépassant pas 15%, à l'exception de la concentration la plus faible (0,20mg/Kg).

**Tableau 38. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans le sol.**

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Concentration moyenne introduite (mg/Kg)	0,200	0,400	1,200	2,000
Concentration moyenne calculée (mg/Kg)	1,907	3,873	10,990	20,248
Biais absolu (mg/Kg)	-0,093	-0,127	-1,010	0,248
Biais relatif (%)	-4,66	-3,19	-8,42	1,24
RSD de répétabilité (%)	<b>20,44</b>	<b>11,77</b>	<b>6,27</b>	<b>3,91</b>
RSD de précision intermédiaire	<b>12,66</b>	<b>9,90</b>	<b>6,75</b>	<b>4,77</b>
Limite de tolérance 60% inférieure	-22,96	-13,88	-14,25	-2,53
Limite de tolérance 60% supérieure	13,64	7,51	-2,59	5,01

#### d. Limite de détection et de quantification

Le Tableau 39 résume les informations concernant les limites de détection et de quantification pour le dosage du Cadmium dans le sol. La méthode analytique est validée pour les limites d'acceptation définies (probabilité 60%, limite d'acceptabilité 15%) et sur les intervalles décrits de [0,4-2,0] mg/Kg avec une LD de 0,020mg/Kg et une LQ de 0,069mg/Kg.

**Tableau 39. Limites de détection et de quantification du Cadmium dans le sol.**

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,0153	0,0188	0,0200	
Blanc 2	0,0174	0,0143	0,0142	
Blanc 3	0,0163	0,0148	0,0153	
SD Blanc	0,0010	0,0024	0,0030	
Limite de Détection (mg/Kg)	0,0090	0,0237	0,0297	<b>0,020</b>
Limite de Quantification (mg/Kg)	0,0301	0,0791	0,0990	<b>0,069</b>



## B. Validation du dosage du Cadmium dans l'eau

### a. Série d'étalonnage

Pour élaborer le plan de validation, nous avons choisi quatre niveaux de concentration, afin d'évaluer la performance de notre méthode : 40%, 100%, 120% et 200%. Cela correspond à des concentrations de 2, 5, 6 et 10 µg/l. Le Tableau 40 montre les résultats bruts des séries d'étalonnage sur trois jours pour le Cadmium au niveau de la matrice de l'eau. La linéarité des droites est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,993.

**Tableau 40. Séries d'étalonnage du Cadmium dans le l'eau sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C %	C théorique (µg/l)	Réponses	Réponses	Réponses
40%	2	0,33209	0,35767	0,31867
100%	5	0,53994	0,55176	0,51807
120%	6	0,56267	0,62087	0,5568
200%	10	0,75953	0,84835	0,80241
<b>Pente</b>	<b>a</b>	0.0524	0.0610	0.0610
<b>Ordonnée à l'origine</b>	<b>b</b>	0.2468	0.2463	0.2038
<b>Coefficient de détermination</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0.9838	0.9981	0.9976

### b. La justesse

En moyenne, le taux de recouvrement est de 99,11%. Nous pouvons conclure que ce résultat satisfait les exigences de validation des procédures d'analyse (Tableau 41).

Tableau 41. Calcul des recouvrements du Cadmium dans l'eau.

Niveau	Concentration (µg/l)	Répétition n	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
40%	2	1	80,67	96,85	95,30	99,21
		2	79,83	84,57	89,83	
		3	84,40	92,28	101,83	
100%	5	1	114,33	101,77	102,25	109,86
		2	114,92	101,38	106,47	
		3	113,52	107,04	105,38	
120%	6	1	98,95	102,13	97,93	98,72
		2	102,02	103,88	100,90	
		3	99,98	100,92	95,06	
200%	10	1	146,12	87,17	95,68	95,04
		2	95,30	95,38	104,03	
		3	98,75	90,87	99,44	

### c. Construction du profil d'exactitude

L'analyse statistique montre que la méthode est fidèle pour chaque niveau de concentration, avec des coefficients de variation intermédiaire ne dépassant pas 15% (Tableau 42).

Tableau 42. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans l'eau.

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Concentration moyenne introduite (µg/l)	2,000	5,000	6,000	10,000
Concentration moyenne calculée (µg/l)	1,811	5,373	6,012	9,619
Biais absolu (µg/l)	-0,189	0,373	0,012	-0,381
Biais relatif (%)	-9,43	7,45	0,20	-3,81
RSD de répétabilité (%)	<b>7,91</b>	<b>5,78</b>	<b>2,69</b>	<b>5,55</b>
RSD de précision intermédiaire (%)	<b>14,83</b>	<b>6,68</b>	<b>5,13</b>	<b>4,90</b>
Limite de tolérance 60% inférieure	-16,20	1,61	-2,42	-8,82
Limite de tolérance 60% supérieure	-2,65	13,29	2,81	1,20

Le profil d'exactitude est aussi représenté par la Figure 24. Les limites inférieure et supérieure de l'intervalle de tolérance sont incluses dans la limite d'acceptabilité fixée à  $\pm 15\%$ .

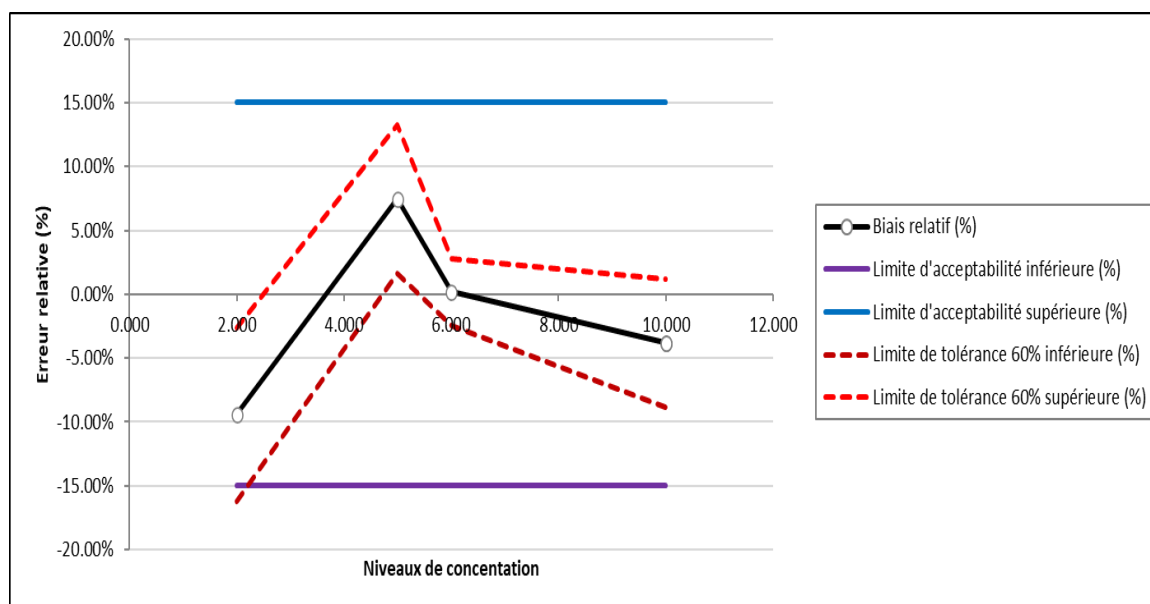


Figure 24. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du cadmium dans l'eau.

#### d. Limite de détection et de quantification

Le Tableau 43 résume les informations concernant les limites de détection et de quantification pour le dosage du Cadmium dans l'eau. La méthode analytique est validée pour les limites d'acceptation définies (Probabilité 60% ; Limite d'acceptabilité 15%) et sur les intervalles décrits de [2-10]  $\mu\text{g/l}$  avec une LD de 0,14 $\mu\text{g/l}$  et une LQ de 0,50 $\mu\text{g/l}$ .

Tableau 43. Limites de détection et de quantification du Cadmium dans l'eau.

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,1399	0,1463	0,1661	
Blanc 2	0,1476	0,1431	0,1605	
Blanc 3	0,1508	0,1430	0,1588	
SD Blanc	0,0041	0,0014	0,0028	
Limite de Détection ( $\mu\text{g/l}$ )	0,2346	0,0711	0,1433	<b>0,1407</b>
Limite de Quantification ( $\mu\text{g/l}$ )	0,7822	0,2371	0,4779	<b>0,4990</b>

### C. Validation du dosage du Cadmium dans les plantes

#### a. Série d'étalonnage

Pour le plan de validation, le nombre de niveaux de concentration choisi est de 4 : 16,67%, 33,33%, 100% et 166,67%. Soit des concentrations : 0,5, 1, 3 et 5mg/Kg. Le Tableau 44 montre les résultats bruts des séries d'étalonnage sur trois jours pour le Cadmium pour les plantes. La linéarité est confirmée par un coefficient de détermination de 0,9879.

**Tableau 44. Séries d'étalonnage du Cadmium dans les plantes sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C%	C théorique (mg/Kg)	Réponses	Réponses	Réponses
16,67%	0,5	0,0400	0,0313	0,0324
33,34%	1	0,0576	0,0489	0,0558
100%	3	0,1227	0,1130	0,1153
166,67%	5	0,1956	0,2010	0,1957
<b>Pente</b>	<b>a</b>	0,0341	0,0369	0,0350
<b>Ordonnée à l'origine</b>	<b>b</b>	0,0249	0,0134	0,0198
<b>Coefficient de détermination</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0,9942	0,9863	0,9832

#### b. Construction du profil d'exactitude

La méthode est fidèle pour chaque niveau de concentration, avec des coefficients de variation de fidélité ne dépassant pas 15%, sauf pour la concentration de 0,5mg/Kg (Tableau 45).

**Tableau 45. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans les plantes.**

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Concentration moyenne introduite (mg/Kg)	0,500	1,000	3,000	5,000
Concentration moyenne calculée (mg/Kg)	0,429	0,983	2,765	5,037
Biais absolu (mg/Kg)	-0,071	-0,017	-0,235	0,037
Biais relatif (%)	-14,24	-1,72	-7,84	0,74
RSD de répétabilité (%)	<b>15,56</b>	<b>12,42</b>	<b>5,88</b>	<b>2,06</b>
RSD de précision intermédiaire (%)	<b>25,70</b>	<b>12,42</b>	<b>6,79</b>	<b>2,61</b>
Limite de tolérance 60% inférieure	-38,02	-13,18	-13,96	-1,91
Limite de tolérance 60% supérieure	9,53	9,75	-1,72	3,39

Le profil d'exactitude est représenté graphiquement avec en abscisse les niveaux de concentration étudiés, en ordonnée le biais relatif (%), et en y reportant le biais relatif moyen par niveau de concentration, les limites de l'intervalle de tolérance ainsi que les limites d'acceptabilité de la méthode (Figure 25).

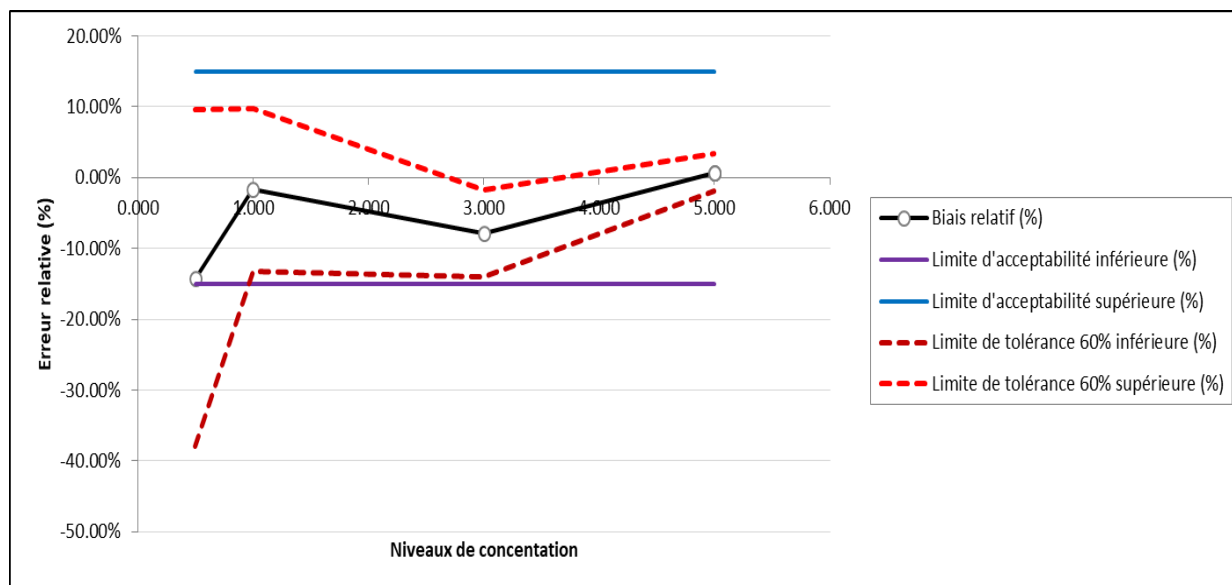


Figure 25. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans les plantes.

c. La justesse

Le recouvrement moyen est égal à 98,58%, ce qui est conforme aux exigences de la validation des procédures d'analyses (Tableau 46).

Tableau 46. Calcul des recouvrements de la validation du Cadmium dans les plantes.

Niveau	Concentration (mg/Kg)	Répétition	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
16,67%	0.5	1	82,06	84,10	68,08	85,76
		2	76,39	85,95	52,52	
		3	107,16	120,47	95,07	
33,34%	1	1	103,15	78,63	110,57	98,28
		2	88,60	104,94	86,20	
		3	95,96	104,58	111,91	
100%	3	1	96,71	90,28	99,72	92,16
		2	99,60	95,98	85,65	
		3	90,39	83,43	87,67	
166,67 %	5	1	117,14	99,81	102,04	102,36
		2	98,40	99,81	97,18	
		3	99,17	105,17	102,54	

**d. Limite de détection et de quantification**

Le Tableau 47 synthétise les informations relatives aux limites de détection et de quantification pour le dosage du Cadmium dans les plantes. La méthode analytique a été validée conformément aux limites d'acceptation définies (probabilité de 60% et limite d'acceptabilité de 15%) et sur la plage de concentrations allant de 1 à 5mg/Kg. Les limites de détection et de quantification sont respectivement de 0,05mg/Kg et 0,16mg/Kg.

**Tableau 47. Limites de détection et de quantification du Cadmium dans les plantes.**

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,0527	0,0558	0,0808	
Blanc 2	0,0517	0,0525	0,0647	
Blanc 3	0,0563	0,0738	0,0732	
Moyenne Blanc	0,0536	0,0607	0,0729	
SD Blanc	0,0018	0,0087	0,0055	
Limite de Détection ( $\mu\text{g/l}$ )	0,0346	0,0664	0,0469	<b>0,049</b>
Limite de Quantification ( $\mu\text{g/l}$ )	0,1153	0,2215	0,1564	<b>0,164</b>

**D. Validation du dosage du Cadmium dans le lait****a. Série d'étalonnage**

Le Tableau 48 présente les résultats bruts des séries d'étalonnage pour le dosage du Cadmium dans le lait, obtenus sur une période de trois jours. Le nombre de niveaux de concentration choisi est de 4 : 25%, 75%, 100% et 125%. Soit des concentrations : 2, 6, 8 et 10 $\mu\text{g/Kg}$ . La linéarité des droites est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,9932.

**Tableau 48. Séries d'étalonnage du Cadmium dans le lait sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C%	C théorique ( $\mu\text{g/Kg}$ )	Réponses	Réponses	Réponses
25%	2	0,38139	0,39272	0,39211
75%	6	0,47554	0,5101	0,49668
100%	8	0,53315	0,5764	0,55907
125%	10	0,57832	0,63155	0,57922
<b>Pente</b>	<b>a</b>	0,0252	0,0281	0,0275
<b>Ordonnée à l'origine</b>	<b>b</b>	0,3279	0,3473	0,3235
<b>Coefficient de détermination</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0,9838	0,9981	0,9976

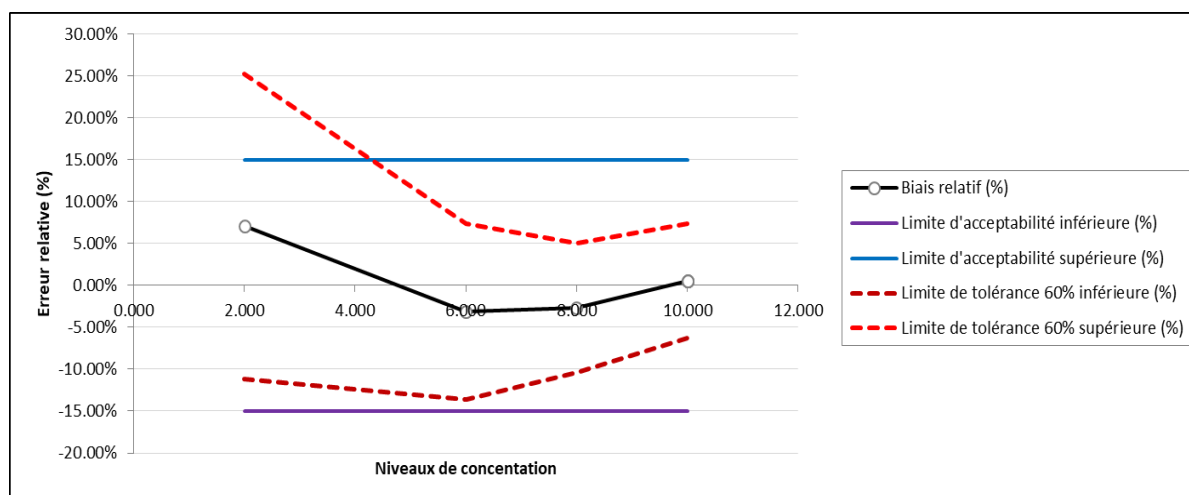
### b. Construction du profil d'exactitude

D'après les résultats de l'analyse statistique, il est démontré que la méthode est fiable pour chaque niveau de concentration sauf pour la concentration la plus basse (2µg/Kg), car le coefficient de variation de fidélité intermédiaire dépasse les 15% (Tableau 49).

**Tableau 49. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans le lait.**

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Concentration moyenne introduite (µg/Kg)	2,000	6,000	8,000	10,000
Concentration moyenne calculée (µg/Kg)	2,141	5,815	7,784	10,056
Biais absolu (µg/Kg)	0,141	-0,185	-0,216	0,056
Biais relatif (%)	7,05	-3,09	-2,70	0,56
RSD de répétabilité (%)	<b>18,07</b>	<b>11,40</b>	<b>8,47</b>	<b>4,11</b>
RSD de précision intermédiaire (%)	<b>18,07</b>	<b>11,49</b>	<b>8,47</b>	<b>6,40</b>
Limite de tolérance 60% inférieure	-11,12	-13,57	-10,44	-6,29
Limite de tolérance 60% supérieure	25,22	7,39	5,04	7,40

Les valeurs moyennes du biais relatif pour chaque niveau de concentration, ainsi que les limites de l'intervalle de tolérance et les limites d'acceptabilité de la méthode sont également indiquées sur la Figure 26.



**Figure 26. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Cadmium dans le lait.**

### c. La justesse (biais)

Les informations utilisées pour calculer les recouvrements sur une période de trois jours sont présentées dans le Tableau 50. Le taux de recouvrement moyen est de 101,51%, répondant ainsi aux critères de validation des procédures d'analyse.

**Tableau 50. Calcul des recouvrements de la validation du Cadmium dans le lait.**

Niveau	Concentration (µg/Kg)	Répétition	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
20%	2	1	97,33	81,02	137,71	<b>107,05</b>
		2	109,08	96,85	118,90	
		3	111,88	93,72	116,96	
40%	6	1	93,74	101,07	97,64	<b>103,50</b>
		2	106,39	103,77	100,69	
		3	105,41	100,37	122,44	
100%	8	1	91,70	101,11	104,58	<b>97,75</b>
		2	106,52	100,97	91,31	
		3	100,03	100,85	82,64	
120%	10	1	91,70	101,11	104,58	<b>97,75</b>
		2	106,52	100,97	91,31	
		3	100,03	100,85	82,64	

### d. Limite de détection et de quantification

Le Tableau 51 synthétise les informations relatives aux limites de détection et de quantification. La méthode analytique est validée conformément aux critères d'acceptation fixés (probabilité de 60% et limite d'acceptabilité de 15%) pour des plages de concentration allant de 2 à 10µg/Kg, avec une limite de détection de 0,26µg/Kg et une limite de quantification de 0,87µg/Kg.

**Tableau 51. Limites de détection et de quantification du Cadmium dans le lait.**

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,0635	0,0534	0,0634	
Blanc 2	0,0635	0,0552	0,0558	
Blanc 3	0,0590	0,0562	0,0529	
SD Blanc	0,0020	0,0010	0,0040	
Limite de Détection (µg/l)	0,2361	0,1078	0,4399	<b>0,2613</b>
Limite de Quantification (µg/l)	0,7871	0,3592	1,4664	<b>0,8709</b>



### II.1.3. Validation analytique du dosage du Nickel

#### A. Validation du dosage du Nickel dans le sol

##### a. Série d'étalonnage

Pour le plan de validation, le nombre de niveaux de concentration choisi est de 5 : 16,67%, 33,34%, 83,33%, 100% et 166,67%. Soit des concentrations : 5, 10, 25, 30 et 50mg/Kg. La linéarité des droites est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,9985 (Tableau 52).

**Tableau 52. Séries d'étalonnage du Nickel dans le sol sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C %	C théorique (mg/Kg)	Réponses	Réponses	Réponses
16,67%	5	0,0789	0,0771	0,0759
33,34%	10	0,1193	0,1255	0,1164
83,34%	25	0,2274	0,2283	0,2304
100%	30	0,2781	0,2662	0,2590
166,67%	50	0,4552	0,4556	0,4599
Pente	a	0,0322	0,0331	0,0267
Ordonnée à l'origine	b	0,0083	0,0082	0,0084
Coefficient de détermination	R <sup>2</sup>	0,9970	0,9938	0,9924

##### b. La justesse

Le Tableau 53 récapitule les données qui ont été utilisées pour le calcul des recouvrements sur une période de trois jours. Il en ressort que le taux de recouvrement moyen est de 102,77%, ce qui est conforme aux exigences requises pour la validation des procédures d'analyse.

Tableau 53. Calcul des recouvrements du dosage du Nickel dans le sol.

Niveau	Concentration (mg/Kg)	Répétitio n	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
16,67%	5	1	103,95	93,17	124,50	<b>112,20</b>
		2	129,69	110,54	105,36	
		3	103,65	117,40	121,57	
33,34%	10	1	102,87	114,90	93,52	<b>107,95</b>
		2	110,69	105,51	108,32	
		3	100,55	116,65	118,53	
83,34%	25	1	90,65	101,24	100,00	<b>95,27</b>
		2	92,10	92,29	91,40	
		3	98,97	91,14	99,64	
100%	30	1	89,69	98,57	89,03	<b>95,05</b>
		2	102,79	93,96	92,54	
		3	103,17	90,82	94,92	
166,67%	50	1	108,30	99,27	101,36	<b>103,38</b>
		2	103,99	104,47	104,07	
		3	100,65	104,39	103,94	

### c. Construction du profil d'exactitude

Les résultats montrent que la méthode est fidèle pour chaque niveau de concentration, avec des coefficients de variation de fidélité intermédiaire ne dépassant pas 15% (Tableau 54).

Tableau 54. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans le sol.

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Concentration moyenne introduite	5,000	10,000	25,000	30,000	50,000
Concentration moyenne calculée	5,610	10,795	23,817	28,516	51,262
Biais absolu	0,610	0,795	-1,183	-1,484	1,262
Biais relatif (%)	12,20	7,95	-4,73	-4,95	2,52
RSD de répétabilité (%)	<b>11,57</b>	<b>7,92</b>	<b>4,54</b>	<b>6,04</b>	<b>1,30</b>
RSD de précision intermédiaire	<b>11,57</b>	<b>7,92</b>	<b>4,80</b>	<b>6,04</b>	<b>2,17</b>
Limite de tolérance inférieure	0,01	-0,08	-9,10	-10,34	0,13
Limite de tolérance supérieure	24,39	15,98	-0,37	0,45	4,92

Le profil d'exactitude est représenté par la Figure 27, avec en abscisse les niveaux de concentration étudiés, en ordonnée le biais relatif (%), et en y reportant le biais relatif moyen par niveau de concentration, les limites de l'intervalle de tolérance ainsi que les limites d'acceptabilité de la méthode.

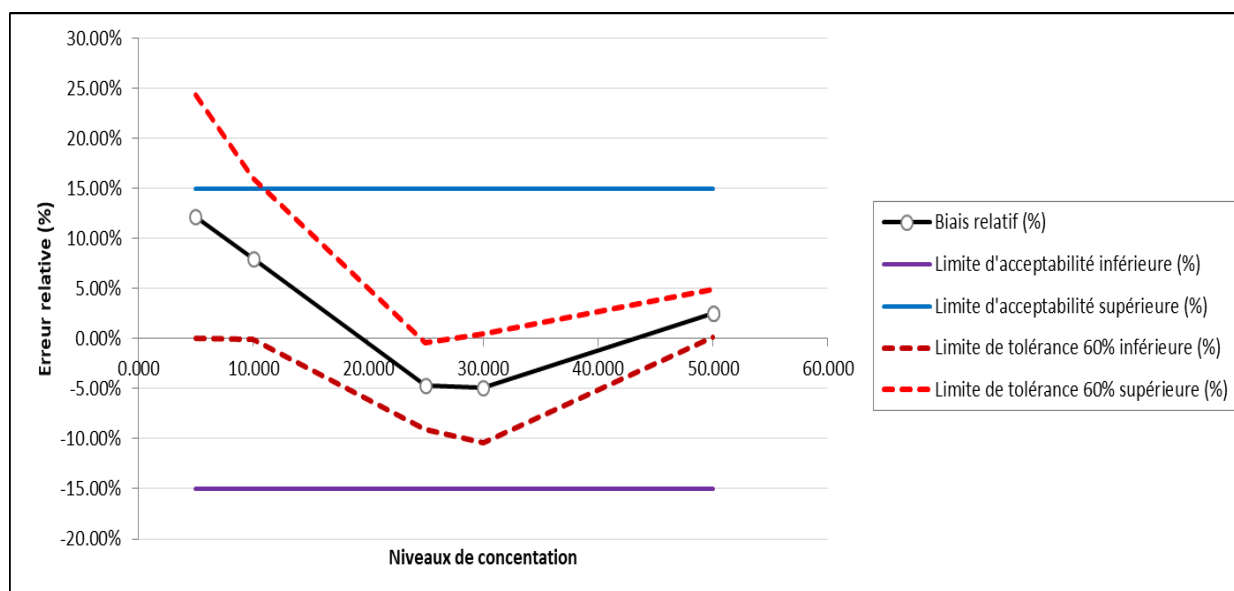


Figure 27. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans le sol.

#### d. Limite de détection et de quantification

Le Tableau 55 résume les informations concernant les limites de détection et de quantification pour le dosage du Ni dans le sol. La méthode analytique est validée sur les intervalles décrits de [5-50] mg/Kg avec une LD de 0,59mg/Kg et une LQ de 1,98 mg/Kg.

Tableau 55. Limites de détection et de quantification du Nickel dans le sol.

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,0153	0,0188	0,02	
Blanc 2	0,0174	0,0143	0,0142	
Blanc 3	0,0163	0,0148	0,0153	
SD Blanc	0,0007	0,0019	0,0023	
Limite de Détection (mg/Kg)	0,1032	0,2773	1,5393	<b>0,593</b>
Limite de Quantification (mg/Kg)	0,3440	0,9245	5,1311	<b>1,976</b>

## B. Validation du dosage du Nickel dans l'eau

### a. Série d'étalonnage

Le Tableau 56 montre les résultats bruts des séries d'étalonnage sur trois jours pour le Nickel au niveau de la matrice de l'eau. Dans le cadre du plan de validation, 5 niveaux de concentrations ont été sélectionnés, à savoir : 16,67%, 33,34%, 83,33%, 100% et 166,67% (5, 10, 25, 30 et 50 µg/l). La linéarité des droites est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,996.

**Tableau 56. Séries d'étalonnage du Nickel dans le l'eau sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C %	C théorique (µg/l)	Réponses	Réponses	Réponses
16,67%	5	0,0559	0,0556	0,0556
33,34%	10	0,0845	0,0868	0,0868
83,34%	25	0,1829	0,1577	0,1577
100%	30	0,1984	0,1897	0,1993
166,67%	50	0,3252	0,2927	0,3114
<b>Pente</b>	<b>a</b>	0,0261	0,0312	0,0266
<b>Ordonnée à l'origine</b>	<b>b</b>	0,0060	0,0052	0,0057
<b>Coefficient de détermination</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0,9944	0,9990	0,9967

### b. La justesse

Selon le Tableau 57, le recouvrement moyen est égal à 100,32%, ce qui est conforme aux exigences de la validation des procédures d'analyses.

Tableau 57. Calcul des recouvrements du Nickel dans l'eau.

Niveau	Concentration ( $\mu\text{g/l}$ )	Répétition	Jour 1 (%)	Jour 2 (%)	Jour 3 (%)	Recouvrement (%)
16,67%	5	1	100,88	89,79	99,31	<b>99,21</b>
		2	99,35	88,80	98,39	
		3	99,35	102,43	110,99	
33,34%	10	1	108,77	98,57	99,27	<b>109,86</b>
		2	99,41	114,98	114,44	
		3	85,50	106,23	106,35	
83,34%	25	1	108,86	103,69	99,12	<b>98,72</b>
		2	109,22	95,81	88,35	
		3	96,97	97,91	91,05	
100%	30	1	94,90	98,80	104,00	<b>95,04</b>
		2	99,16	98,96	102,68	
		3	94,59	105,76	99,02	
166,67%	50	1	97,72	97,36	110,23	<b>101,94</b>
		2	103,01	103,82	91,91	
		3	108,56	99,24	100,32	

### c. Construction du profil d'exactitude

Les résultats de l'analyse statistique montrent que la méthode est fidèle pour chaque niveau de concentration, avec des coefficients de variation ne dépassant pas 15% (Tableau 58).

Tableau 58. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans l'eau.

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Concentration moyenne introduite ( $\mu\text{g/l}$ )	5,000	10,000	25,000	30,000	50,000
Concentration moyenne calculée ( $\mu\text{g/l}$ )	4,940	10,515	24,750	29,929	50,190
Biais absolu ( $\mu\text{g/l}$ )	-0,060	0,515	-0,250	-0,071	0,190
Biais relatif (%)	-1,19	5,15	-1,00	-0,24	0,38
RSD de répétabilité (%)	<b>6,03</b>	<b>8,37</b>	<b>7,13</b>	<b>4,37</b>	<b>7,82</b>
RSD de précision intermédiaire (%)	<b>6,88</b>	<b>8,62</b>	<b>7,33</b>	<b>4,37</b>	<b>7,82</b>
Limite de tolérance 60% inférieure	-7,82	-3,43	-7,87	-4,33	-6,99
Limite de tolérance 60% supérieure	5,44	13,74	5,87	3,86	7,75

Le profil d'exactitude est représenté graphiquement avec en abscisse les niveaux de concentration étudiés, en ordonnée le biais relatif (%), et en y reportant le biais relatif moyen par niveau de concentration, les limites de l'intervalle de tolérance ainsi que les limites d'acceptabilité de la méthode (Figure 28).

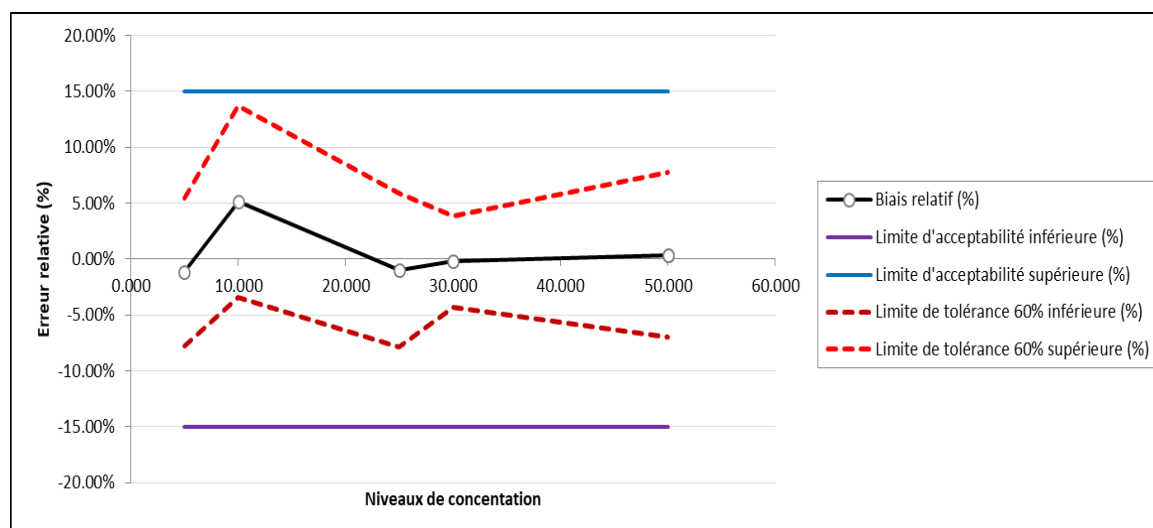


Figure 28. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans l'eau.

#### d. Limite de détection et de quantification

Le Tableau 59 présente un résumé des informations relatives aux limites de détection et de quantification. La méthode analytique a été validée sur des plages de concentration allant de 5 à 50 µg/l. La limite de détection est de 1,24 µg/l et la limite de quantification est de 4,13 µg/l.

Tableau 59. Limites de détection et de quantification du Nickel dans l'eau.

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,04048	0,03095	0,03604	
Blanc 2	0,0357	0,0279	0,03402	
Blanc 3	0,04265	0,02356	0,03115	
Moyenne Blanc	0,03961	0,02747	0,03373	
SD Blanc	0,0026	0,002	0,0017	
Limite de Détection (µg/l)	1,3092	1,496	0,9154	<b>1,240</b>
Limite de Quantification (µg/l)	4,3640	4,989	3,0515	<b>4,135</b>

### C. Validation du dosage du Nickel dans le lait

#### a. Série d'étalonnage

Le Tableau 60 montre les résultats bruts des séries d'étalonnage sur trois jours pour le Nickel dans le lait. Le nombre de niveaux de concentration choisi est de 4 : 33%, 66%, 100% et 166%. Soit des concentrations : 5, 10, 15 et 25µg/Kg. La linéarité des droites est confirmée par un coefficient de détermination acceptable de 0,9813.

**Tableau 60. Séries d'étalonnage du Nickel dans le lait sur trois jours.**

Série d'étalonnage SE		Jour 1	Jour 2	Jour 3
Niveau C %	C théorique (µg/Kg)	Réponses	Réponses	Réponses
33%	5	0,05263	0,0492	0,06288
66%	10	0,0741	0,0741	0,08103
100%	15	0,11835	0,11076	0,1100
166%	25	0,16904	0,16107	0,18531
<b>Pente</b>	<b>a</b>	0,02252	0,021977	0,023001
<b>Ordonnée à l'origine</b>	<b>b</b>	0,005917	0,005607	0,006300
<b>Coefficient de détermination</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0,973595	0,993045	0,980102

#### b. Construction du profil d'exactitude

Les résultats du Tableau 61 montrent que la méthode est fidèle pour chaque niveau de concentration, avec des coefficients de variation de fidélité intermédiaire ne dépassant pas 15%.

**Tableau 61. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans le lait.**

Critères de validation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Concentration moyenne introduite	5,000	15,000	25,000
Concentration moyenne calculée	5,043	15,012	24,974
Biais absolu	0,043	0,012	-0,026
Biais relatif (%)	0,87%	0,08%	-0,10%
Recouvrement (%)	<b>100.87%</b>	<b>100.08%</b>	<b>99,90%</b>
RSD de répétabilité (%)	<b>5,37%</b>	<b>9,24%</b>	<b>3,73%</b>
RSD de précision intermédiaire (%)	<b>6,02%</b>	<b>9,24%</b>	<b>6,02%</b>
Limite de tolérance 60% inférieure	-5,03%	-8,60%	-6,55%
Limite de tolérance 60% supérieure	6,76%	8,76%	6,35%

Le profil d'exactitude est représenté graphiquement dans la Figure 29, avec en abscisse les niveaux de concentration étudiés, en ordonnée le biais relatif (%), et en y reportant le biais relatif moyen par niveau de concentration, les limites de l'intervalle de tolérance ainsi que les limites d'acceptabilité de la méthode.

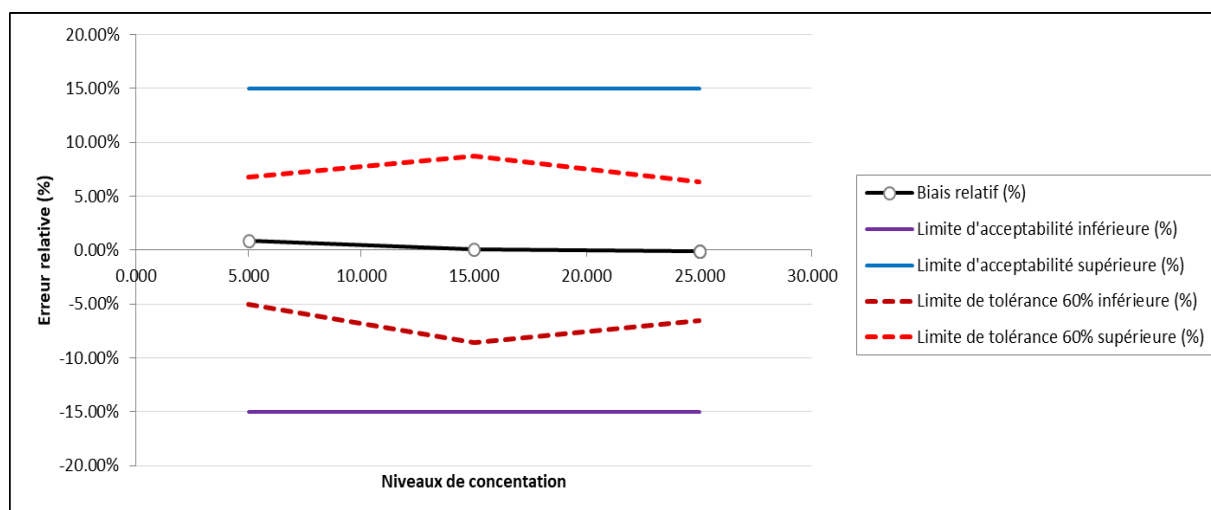


Figure 29. Profil d'exactitude de la méthode de dosage du Nickel dans le lait.

### c. Limite de détection et de quantification

Le Tableau 62 résume les informations concernant les limites de détection et de quantification pour le dosage du Ni dans lait. La méthode analytique est validée pour les limites d'acceptation définies (Probabilité 60% ; Limite d'acceptabilité 15%) et sur les intervalles décrits de [5-25]  $\mu\text{g}/\text{Kg}$  avec une LD de  $0,54\mu\text{g}/\text{Kg}$  et une LQ de  $1,81\mu\text{g}/\text{Kg}$ .

Tableau 62. Limites de détection et de quantification du Nickel dans le lait.

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Moyenne
Blanc 1	0,04048	0,03095	0,03604	
Blanc 2	0,0357	0,0279	0,03402	
Blanc 3	0,04265	0,02356	0,03115	
SD Blanc	0,00068	0,0016	0,00091	
Limite de Détection ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	0,34476	0,8560	0,4333	<b>0,544</b>
Limite de Quantification ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	1,14923	2,8535	1,4444	<b>1,815</b>



### II.1.4. Résumé des domaines de linéarité et des limites de détection et de quantification pour les méthodes validées

Le Tableau 63 résume le domaine de validation ainsi que les limites de détection et de quantification de chaque méthode analytique utilisée.

**Tableau 63. Récapitulatif des performances de chaque méthode analytique validée.**

Matrice	Elément	Domaine de linéarité	LD	LQ
Sol	Plomb	5-50mg/Kg	0,54mg/Kg	1,80mg/Kg
	Cadmium	0,4-2,0mg/Kg	0,02mg/Kg	0,07mg/Kg
	Nickel	5-50mg/Kg	0,59mg/Kg	1,98mg/Kg
Eau	Plomb	5-50µg/l	0,21µg/l	0,72µg/l
	Cadmium	2-10µg/l	0,14µg/l	0,50µg/l
	Nickel	5-50µg/l	1,24µg/l	4,13µg/l
Plantes	Plomb	2-10mg/Kg	0,28mg/Kg	0,92mg/Kg
	Cadmium	0,5-5mg/Kg	0,05mg/Kg	0,16mg/Kg
Lait	Plomb	5-30µg/Kg	0,41µg/Kg	1,37µg/Kg
	Cadmium	2-10µg/Kg	0,16µg/Kg	0,87µg/Kg
	Nickel	5-25µg/Kg	0,54µg/Kg	1,81µg/Kg

### II.1.5. Résultats des contrôles de qualités effectuées

Pour évaluer la précision de la méthode, des échantillons enrichis avec des concentrations connues ont été soumis à l'analyse. Les taux de recouvrement des éléments à partir des échantillons enrichis sont détaillés dans le Tableau 64.

Dans les échantillons de lait et d'eau, le recouvrement pour les différents métaux variait de 90,74 % à 109,32 % et de 90,50 % à 108,40 %, respectivement.

**Tableau 64. Résultats des contrôles de qualités effectuées.**

Valeur du recouvrement des contrôles en pourcentage (%)				
Elément	Sol	Eau	Plantes	Lait
Plomb	[90,39-108,98]	[92,30-108,40]	[90,47-108,47]	[95,30-109,32]
Cadmium	[91,30-105,44]	[91,55-106,03]	[96,38-107,40]	[98,92-108,11]
Nickel	[90,37-108,31]	[90,50-107,22]	-	[91,35-109,87]
Mercure	-	[91,97-104,57]	-	[90,74-102,44]

II.2. Analyse environnementale et spatiale des élevages de l'étude

D'après l'enquête sur terrain et l'analyse environnementale, différentes sources de pollution ont pu être identifiées et sont présentées graphiquement par la Figure 30 de façon générale et au niveau de l'annexe 2 du document de façon détaillée, mettant en valeur plusieurs sources de pollutions potentielles notamment les stations d'essence à proximité de certains élevages.

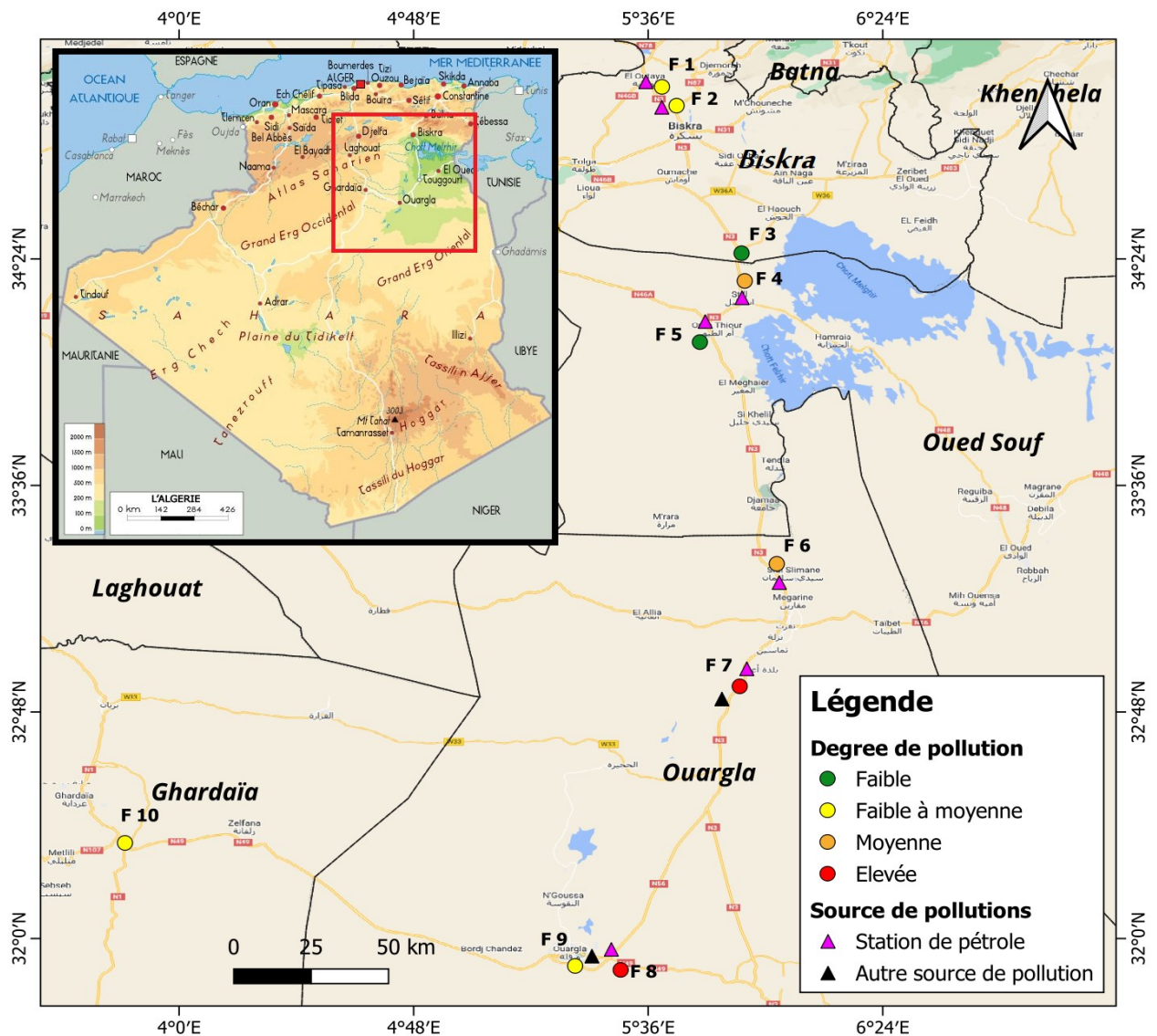


Figure 30. Degrés de pollution des élevages selon l'analyse spatiale.

Le Tableau 65 montre les résultats des indicateurs de pollution pour chaque ferme étudiée. L'indice de pollution a varié de 3 à 8 selon la localisation du site. Cet indice est censé exprimer un gradient du risque de contamination pour chaque élevage.

Les élevages proches des stations d'essence ont un score de pollution plus important avec le score le plus élevé retrouvé pour l'élevage 7 (GPS : 32°55'56,8"N 5°55'37.3"E). Ce dernier se situe à proximité de deux stations d'essence avec une distance de 165 m et 4,17 Km respectivement, ainsi que d'une cimenterie (465 m).

**Tableau 65. Indicateurs de la pollution des élevages étudiés.**

Sites de collecte	Déchets dans les zones de pâturage	Véhicules motorisés dans les pâturages	Route à circulation	Proximité station d'essence	Distance d'usines, de villes	Score de pollution
<b>Elevage 1</b>	1	1	0	1	3	<b>6</b>
<b>Elevage 2</b>	1	1	1	2	1	<b>5</b>
<b>Elevage 3</b>	1	0	1	0	1	<b>3</b>
<b>Elevage 4</b>	1	0	1	2	2	<b>6</b>
<b>Elevage 5</b>	1	0	1	2	3	<b>7</b>
<b>Elevage 6</b>	1	0	1	1	3	<b>6</b>
<b>Elevage 7</b>	1	1	1	2	3	<b>8</b>
<b>Elevage 8</b>	1	0	1	1	3	<b>6</b>
<b>Elevage 9</b>	0	1	0	0	2	<b>3</b>
<b>Elevage 10</b>	1	0	1	0	3	<b>5</b>

### II.3. Concentrations des métaux au niveau des différentes matrices

La section actuelle présente les concentrations résiduelles des métaux étudiés (Cd, Ni, Pb et Hg) dans les matrices environnementales (le sol, l'eau d'abreuvement et les plantes), ainsi que dans le lait de la chamelle.

#### II.3.1. Etude du sol

##### A. Concentration des éléments traces métalliques dans le sol

Les concentrations des trois métaux analysés dans le sol, ainsi que les valeurs de fond (Bn) en éléments métalliques, sont présentées dans Tableau 66. Sur la base de la concentration moyenne arithmétique, les métaux dans les sols ont été classés dans l'ordre décroissant suivant : Plomb > Nickel > Cadmium.

Les concentrations de Plomb et Cadmium ont varié considérablement, tandis que les concentrations de Nickel ont été plus homogènes à travers les sols des élevages sélectionnés. Le coefficient de variabilité (CV) est le facteur le plus important pour décrire la variabilité. Les concentrations du Nickel étaient comparables à la valeur de fond calculée (25mg/Kg), tandis que la concentration moyenne de Plomb était 2,4 fois plus élevée que la valeur de fond (15mg/Kg).

**Tableau 66. Concentrations des éléments traces métalliques et coefficients de variations des sols échantillonnés.**

Elément trace métallique	Concentration (mg/Kg)		Coefficient de variabilité (CV %)	Valeur de fond (Bn)
	Plage de concentrations	Moyenne arithmétique ± écart type		
Plomb (n : 40)	[25,975 – 67,418]	40,104±10,488	68,10%	15mg/Kg
Cadmium (n : 40)	[0,154 - 2,666]	0,933±0,676	71,40%	0,5mg/Kg
Nickel (n : 40)	[18,269 – 39,669]	27,587±6,090	43,76%	25mg/Kg

### B. Variations saisonnières de la concentration en éléments traces métalliques

Le Tableau 67 montre les variations saisonnières des concentrations des éléments métalliques dans le sol. Le test de Friedman a révélé une différence non significative entre les saisons, avec une valeur de  $p > 0,05$ . Cependant, la concentration moyenne de Plomb et de Cadmium étaient plus élevées pendant les saisons du printemps et d'été, qui sont caractérisées par des vents de sable importants par rapport aux autres saisons.

**Tableau 67. Variations saisonnières des concentrations des éléments métalliques dans le sol et test de Friedman.**

Elément trace métallique	Concentration (mg/Kg)				Valeur du $p$ (Test de Friedman)
	Automne (n=10)	Hiver (n=10)	Printemps (n=10)	Été (n=10)	
<b>Plomb</b>	40,118±11,475	38,635±11,201	42,762±11,660	38,901±8,470	0,145
<b>Cadmium</b>	0,872 ± 0,741	0,738 ± 0,515	1,019 ± 0,792	1,104±0,673	0,430
<b>Nickel</b>	26,201± 6,062	29,223 ± 5,717	27,538 ± 5,907	27,388±7,157	0,896

### C. Variation spatiale des concentrations des métaux dans le sol

Afin de mieux cerner l'impact potentiel des sources de pollution sur la concentration des métaux, deux zones distinctes ont été divisées ; sites se situant à moins de 5Km d'une station d'essence (6 élevages) et sites se situant à plus de 5 km d'une station (4 élevages).

Les résultats présentés dans le Tableau 68 ont indiqué que les valeurs maximales des éléments métalliques ont été observées dans les zones situées à proximité des stations-service (zone A ; moins de 5Km). Cependant, les concentrations n'ont pas diminué de manière significative au-delà de cette distance ( $p > 0,05$ ).

**Tableau 68. Distribution spatiale des métaux analysés dans les sols. Zone A : sol proche de station d'essence (moins de 5Km), Zone B : sols échantillonnés au-delà de 5Km.**

Elément trace métallique	Concentration (mg/Kg)		Valeur du $p$ (Test de Mann-Whitney)
	Zone A (n=24)	Zone B (n=16)	
Plomb	41,644±12,623 [25,975 – 67,418]	39,078±8,937 [27,529 – 61,462]	0,629
Cadmium	0,973±0,699 [0,215 – 2,666]	0,907±0,606 [0,154 – 2,603]	0,885
Nickel	28,748 ± 5,374 [18,269 – 39,669]	25,846±6,838 [19,454 – 38,958]	0,112

### D. Analyse statistique multivariée

#### Analyse de corrélation de Kendall du sol

Le Tableau 69 présente les résultats du coefficient de corrélation de Kendall pour les trois métaux analysés (Pb, Cd, Ni). Les résultats ont indiqué que sur les sites, les concentrations du Cadmium et du Plomb étaient positivement corrélées de façon significative ( $r=0,604$ ), tandis que les valeurs étaient pratiquement indépendantes entre le Plomb et le Cadmium avec le Nickel.

**Tableau 69. Corrélation entre les métaux pour les échantillons de sol.**

Variables	Plomb	Cadmium	Nickel
Plomb	1		
Cadmium	0,604	1	
Nickel	-0,012	-0,025	1

### Analyses en composantes principales pour les métaux du sol

Afin d'évaluer la corrélation entre les métaux dans le sol, une analyse en composantes principales a été également utilisée. Les données ont révélé un modèle factoriel expliquant 86,81% de la variance totale, avec l'axe 1 expliquant 53,51% et l'axe 2 expliquant 33,30% (Figure 31). La variabilité se caractérise par une corrélation positive entre le couple Cadmium -Plomb en accord avec les résultats de la corrélation obtenus pour les échantillons.

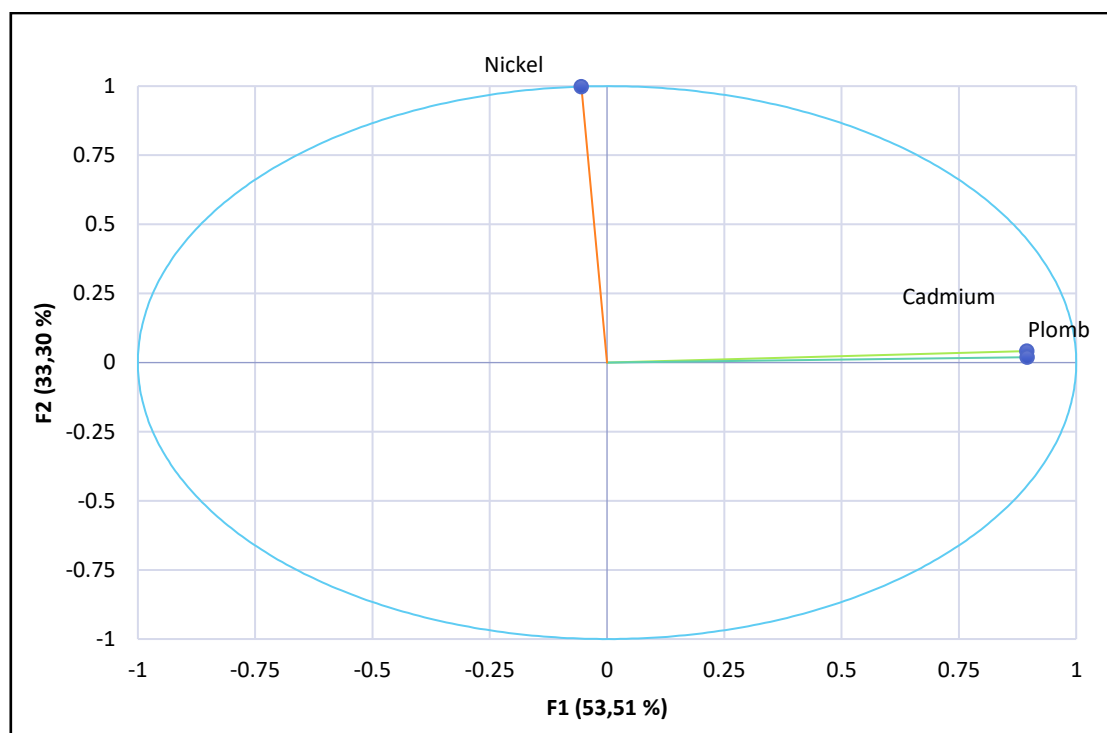


Figure 31. ACP avec représentations de rotation pour les métaux du sol.

### E. Indice de geoaccumulation des métaux

Pour estimer l'intensité de la contamination métallique du sol, l'indice de geoaccumulation « Igeo » a été utilisé. Son principe est fondé sur la comparaison des valeurs mesurées par rapport à des valeurs références.

Le Plomb est le polluant le plus important parmi les éléments mesurés. Les valeurs Igeo pour chaque métal dans le sol sont de 0,55 à 1,39 pour le Plomb, -1,27 à 1,43 pour le Cadmium, -0,54 à 0,07 pour le Nickel (Tableau 70).

Les résultats indiquent que les sols des élevages sont majoritairement non à modérément pollués pour le Plomb, à l'exception d'un élevage qui est modérément polluée ( $1 < I_{geo} < 2$ ). Pour le Nickel, à l'exception d'un seul élevage, tous les échantillons étudiés avaient un Igeo inférieur à 0, ce qui indique que l'environnement n'est pas pollué par cet élément.

Tableau 70. Valeurs Igeo des sols de élevages échantillonnés.

Elément trace métallique	Igeo		Valeur de fond (Bn)
	Plage de valeur	Moyenne arithmétique ± écart type	
Plomb	[0,56 – 1,39]	0,82±0,23	15mg/Kg
Cadmium	[-1,27 - 1,43]	0,09±0,86	0,5mg/Kg
Nickel	[-0,54 – 0,07]	-0,13±0,07	25mg/Kg

### II.3.2. Etude de l'eau d'abreuvement

L'appréciation de la qualité des eaux d'abreuvement (n=40) s'est basée sur la mesure des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, salinité, turbidité), ainsi que le dosage des éléments traces (Pb, Cd, Ni, Hg).

#### A. Paramètres physico-chimiques de l'eau d'abreuvement

Le Tableau 71 présente les différents paramètres physico-chimiques calculés pour les échantillons d'eau. Le pH de l'eau était généralement alcalin avec une moyenne arithmétique de 7,41±0,35.

Tableau 71. Paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau d'abreuvement prélevés.

Paramètre physico-chimique	Valeur	
	Plage de valeur	Moyenne arithmétique ± écart type
pH (n=40)	[6,79 – 8,63]	7,41±0,35
Conductivité (mS/cm <sup>2</sup> ) (n=40)	[2,66 – 8,14]	5,59±2,21
Salinité (psu) (n=40)	[1,38 – 4,51]	2,25±1,13
Turbidité (NTU) (n=40)	[0,14 – 1,34]	0,51±0,91

#### B. Concentration en éléments traces métalliques dans l'eau d'abreuvement

Les concentrations des trois métaux analysés dans l'eau, ainsi que les valeurs réglementaires en éléments métalliques dans l'eau, sont présentées dans le Tableau 72. Sur la base de la concentration moyenne, les concentrations moyennes des éléments traces dans l'eau ont été classées dans l'ordre décroissant suivant : Nickel > Plomb > Cadmium > Mercure.

**Tableau 72. Concentrations des éléments traces métalliques des eaux d'abreuvement échantillonnées.**

Elément trace métallique	Concentration (µg/l)		Norme réglementaire	Nombre d'échantillons dépassant la norme
	Plage de concentrations	Moyenne arithmétique ± écart type		
Plomb (n : 40)	[1,73 – 18,27]	9,14±4,21	10µg/l	16/40 (40%)
Cadmium (n : 40)	[0,14 - 1,01]	0,41±0,24	3µg/l	0/40 (00%)
Nickel (n : 40)	[7,84 – 31,07]	16,57±5,79	70µg/l	0/40 (00%)
Mercure (n : 40)	[ND – 1,31]	0,53±0,33	6µg/l	0/40 (00%)

### C. Variation saisonnière de la concentration en éléments traces dans l'eau d'abreuvement

Les concentrations de métaux étudiées durant les quatre saisons ainsi que l'analyse de Friedman sont récapitulées dans le Tableau 73. Le test de Friedman montre une différence non significative de la concentration des métaux au fil des saisons. Selon le coefficient de variation, la variabilité relative des métaux étudiés a suivi l'ordre suivant : Cadmium > Mercure > Plomb > Nickel.

**Tableau 73. Variations saisonnières des concentrations des métaux dans les échantillons d'eau d'abreuvement et test de Friedman.**

Elément trace métallique	Concentration(µg/l)				Valeur du <i>p</i> (Friedman test)
	Automne (n=10)	Hiver (n=10)	Printemps (n=10)	Eté (n=10)	
Plomb	9,108±3,505	9,052±5,020	9,324±4,668	9,079±4,177	0,989
Cadmium	0,317±0,194	0,348±0,157	0,405±0,250	0,563±0,307	0,118
Mercure	0,383±0,259	0,543±0,393	0,558±0,216	0,646±0,419	0,353
Nickel	17,291±6,397	16,933±5,610	15,647±6,535	16,393±5,330	0,896

### C. Variation spatiale des concentrations en métaux dans les échantillons d'eau d'abreuvement

Le Tableau 74 révèle que les concentrations en polluants dans les eaux d'abreuvement diminuent progressivement en s'éloignant des stations-service. Cette diminution s'est avérée significative pour le Plomb, le Mercure et le Cadmium selon le test de Mann-Whitney ( $p < 0,05$ ).



**Tableau 74. Distribution spatiale des métaux analysés dans l'eau d'abreuvement. Zone A : site proche d'une station d'essence (moins de 5 km), zone B : site au-delà de 5 km.**

Elément trace métallique	Concentration( $\mu\text{g/l}$ )		Valeur du $p$ (Mann-Whitney)
	Zone A (n=24)	Zone B (n=16)	
Plomb	10,526 $\pm$ 4,014 [2,296- 18,266]	8,217 $\pm$ 4,161 [1,731 –16,732]	<b>0,016</b>
Mercure	0,560 $\pm$ 0,345 [0,104 –1,284]	0,492 $\pm$ 0,324 [0,062-1,315]	<b>0,001</b>
Cadmium	0,462 $\pm$ 0,267 [0,146- 1,012]	0,327 $\pm$ 0,185 [0,140- 0,673]	<b>0,001</b>
Nickel	17,377 $\pm$ 5,453 [8,640- 29,980]	15,349 $\pm$ 6,238 [7,840- 31,070]	0,490

#### D. Analyse statistique multivariée

##### Analyse de corrélation de Kendal pour les métaux dans l'eau d'abreuvement

Les résultats du coefficient de corrélation de Kendal des métaux pour les échantillons d'eau sont présentés dans le Tableau 75. Une faible corrélation positive a été observée entre le Plomb et les différents éléments. De plus, une faible corrélation positive et non significative a été observée entre le Nickel et les autres métaux.

**Tableau 75. Corrélation entre les différents éléments pour les échantillons d'eau d'abreuvement.**

Variabes	Plomb	Mercure	Cadmium	Nickel
<b>Plomb</b>	<b>1</b>			
<b>Mercure</b>	0,045	<b>1</b>	<sup>2</sup>	
<b>Cadmium</b>	-0,009	-0,180	<b>1</b>	
<b>Nickel</b>	0,105	0,127	0,145	<b>1</b>

##### Analyses en composantes principales pour les métaux de l'eau d'abreuvement

Pour vérifier la corrélation entre les différents éléments, une analyse en composantes principales a été appliquée. Selon les résultats des données représentés dans la Figure 32, un modèle factoriel explique que 59,17% de la variance totale a été sélectionné. Le modèle montre une corrélation positive entre le Plomb et le Nickel.

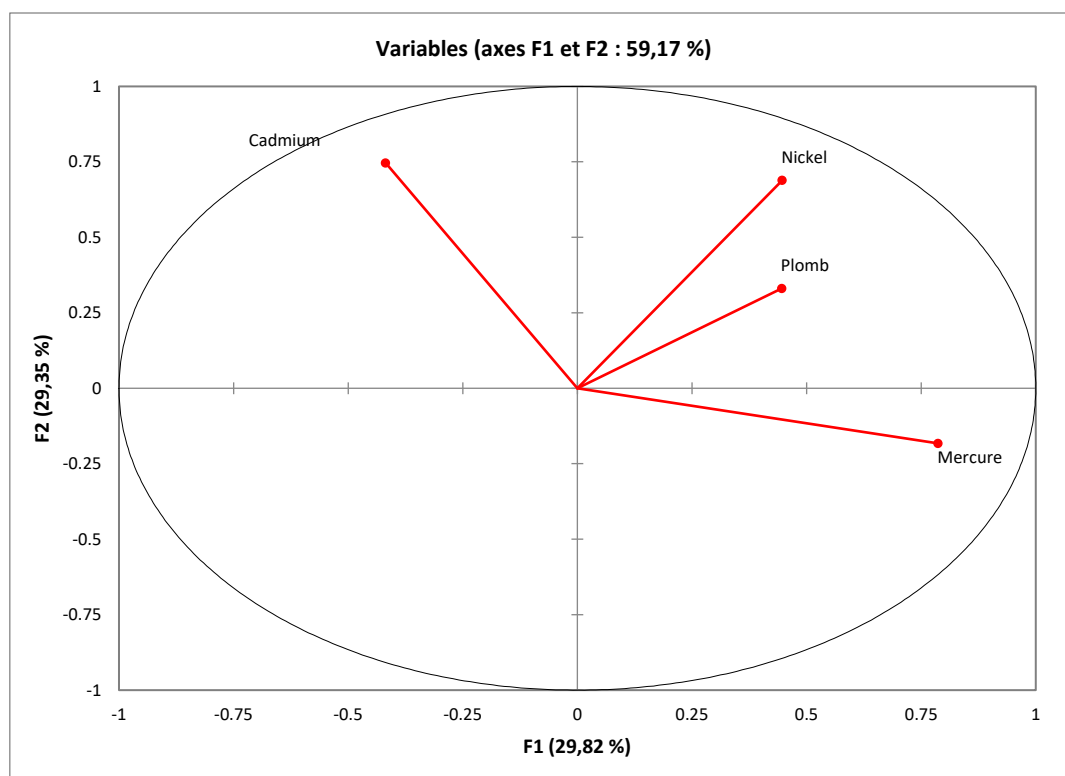


Figure 32. ACP pour les métaux dans l'eau d'abreuvement.

### II.3.3. Etude des plantes

#### A. Concentration des éléments traces métalliques

Le Tableau 76 illustre la distribution de la concentration du Plomb et du Cadmium dans les plantes échantillonnées.

Tableau 76. Concentrations des éléments traces métalliques des plantes échantillonnées.

Elément trace métallique	Concentration (mg/Kg)	
	Plage de concentrations	Moyenne arithmétique $\pm$ écart type
Plomb (n : 40)	[1,07 – 13,43]	6,97 $\pm$ 4,24
Cadmium (n : 40)	[0,11 - 1,40]	0,60 $\pm$ 0,37

#### B. Variations saisonnières de la concentration en éléments traces métalliques

La Tableau 77 montre les concentrations des métaux dans les plantes échantillonnées selon la saison de collecte. Les concentrations moyennes maximales des deux métaux ont été observées durant le printemps. Cependant, l'analyse de Friedman montre une différence non significative pour la concentration du Plomb et du Cadmium au fil des saisons.

**Tableau 77. Concentrations des éléments traces métalliques au niveau des plantes en fonction des saisons et analyse de Friedman.**

Elément trace métallique	Concentration (mg/Kg)				Valeur du $p$ (Friedman test)
	Automne (n=10)	Hiver (n=10)	Printemps (n=10)	Eté (n=10)	
Plomb	6,118±4,272	6,886±4,202	8,357±4,149	6,529±4,651	0,145
Cadmium	0,552±0,334	0,525±0,349	0,739±0,379	0,593±0,416	0,197

### C. Variation spatiale des concentrations de métaux dans les plantes

Le Tableau 78 montre que les concentrations du Cadmium et du Plomb dans les plantes diminuent significativement au-delà de 5 Km des zones qui englobent les stations d'essence ( $p < 0,05$ ). De plus, les concentrations maximales sont observées dans les zones proches des stations d'essence.

**Tableau 78. Distribution spatiale des métaux analysés dans les plantes. Zone A : site proche d'une station d'essence (moins de 5 Km), Zone B : site au-delà de 5 Km.**

Elément trace métallique	Concentration (mg/Kg)		Valeur du $p$ (test Mann Whitney)
	Zone A (n=24)	Zone B (n=16)	
Plomb	7,378±4,588 [1,077- 13,430]	6,364±3,717 [2,500 – 13,290]	< 0,001
Cadmium	0,627±0,378 [0,111- 1,400]	0,566±0,356 [0,115 – 1,197]	< 0,001

### D. Analyse statistique de corrélation

Les résultats du coefficient de corrélation de Kendall des métaux (Pb, Cd) sont présentés dans le Tableau 79. Tout comme pour la matrice du sol, une corrélation positive a été reportée entre les deux métaux dans les plantes.

**Tableau 79. Corrélation entre les métaux pour les plantes.**

Variables	Plomb	Cadmium
Plomb	1	
Cadmium	0,051	1

### II.3.4. Etude du lait

#### A. Propriétés physico-chimiques du lait de chamelle

Le Tableau 80 montre les propriétés physico-chimiques des échantillons de lait de chamelle analysés (n=10).

**Tableau 80. Propriétés physico-chimiques des échantillons de lait de chamelle.**

Paramètre physico-chimique	Valeur	
	Plage de valeur	Moyenne arithmétique ± écart type
pH (n : 10)	[6,29–6,70]	6,59±0,12
Protéines (n : 10)	[2,70 – 4,00]	3,22±0,38

#### B. Concentration des éléments traces métalliques

Les concentrations des métaux dans les échantillons de lait de chamelle (n=120) sont présentées dans le Tableau 81. 32% (38/120) des échantillons de lait ont dépassé la norme réglementaire de 20µg/Kg selon le *Codex Alimentarius*.

**Tableau 81. Concentrations des éléments traces métalliques dans les échantillons de lait de chamelle.**

Elément trace métallique	Concentration (µg/Kg)		Norme réglementaire	Nombre d'échantillons dépassant la norme
	Plage de concentrations	Moyenne arithmétique ± écart type		
Plomb (n : 120)	[8,28 – 57,27]	26,32±12,85	20µg/Kg	38/120 (32%)
Cadmium (n : 120)	[0,15 - 1,15]	0,95±0,17	2,6µg/Kg	0/120 (00%)
Nickel (n : 120)	[9,23 – 20,17]	16,85±2,06	-	-
Mercure (n : 120)	[0,17 – 1,02]	0,50±0,18	-	-

#### C. Répartition spatiale de la teneur des métaux selon le site de l'élevage

La Figure 33 présente visuellement la répartition des métaux dans le lait selon la localisation de chaque élevage. Neuf fermes présentaient une valeur moyenne supérieure à la norme réglementaire de Plomb dans le lait (> 20µg/Kg), tandis qu'aucune ferme ne présentait de concentration supérieure à la norme du Cadmium.

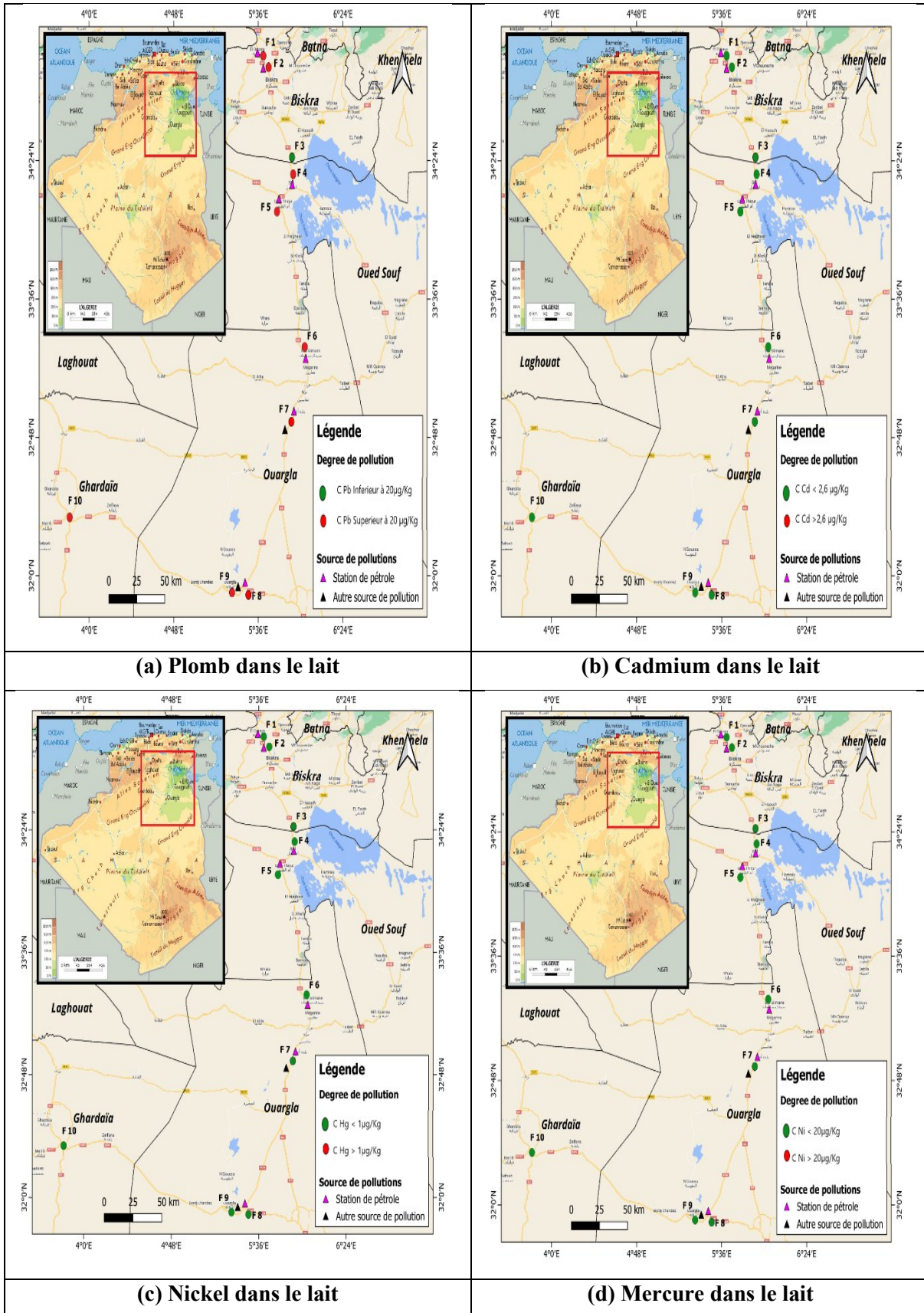


Figure 33. Répartition des métaux lourds dans le lait selon la localisation de chaque élevage.

**D. Variation saisonnière des concentrations en éléments traces métalliques**

Le Tableau 82 montre les concentrations des métaux dans les échantillons de lait selon la saison de collecte des échantillons. Les concentrations moyennes maximales pour le Plomb ont été observées durant la saison du printemps. L'analyse ANOVA ne montre cependant aucune différence significative pour la concentration des métaux analysés au fil des saisons.

**Tableau 82. Concentrations des éléments traces métalliques des échantillons de lait de chamelle en fonction des saisons et analyse ANOVA.**

Elément métallique	Concentration ( $\mu\text{g/Kg}$ )				Valeur du $p$ (ANOVA)
	Automne (n=30)	Hiver (n=30)	Printemps (n=30)	Eté (n=30)	
Plomb	24,26 $\pm$ 11,08 [8,28 – 51,12]	24,703 $\pm$ 13,184 [11,55 – 49,02]	29,467 $\pm$ 14,530 [14,16– 57,27]	27,150 $\pm$ 12,442 [13,50 – 53,01]	0,351
Cadmium	0,854 $\pm$ 0,269 [0,15 – 1,18]	0,979 $\pm$ 0,108 [0,65 – 1,14]	0,967 $\pm$ 0,122 [0,58 – 1,19]	0,983 $\pm$ 0,068 [0,83 – 1,11]	0,659
Mercure	0,526 $\pm$ 0,126 [0,17 – 0,67]	0,532 $\pm$ 0,096 [0,24 – 0,65]	0,496 $\pm$ 0,227 [0,17 – 1,02]	0,459 $\pm$ 0,220 [0,17 – 0,98]	0,523
Nickel	17,492 $\pm$ 2,197 [10,17 – 20,71]	16,886 $\pm$ 1,972 [10,87 – 20,64]	16,466 $\pm$ 1,802 [10,06 – 19,38]	16,551 $\pm$ 2,198 [9,23 – 20,08]	0,667

**E. Variation spatiale des concentrations en métaux des échantillons de lait**

Le Tableau 83 montre que les concentrations dans les échantillons de lait ont diminué significativement au-delà de 5 Km des stations d'essence pour tous les métaux étudiés.

**Tableau 83. Distribution spatiale des métaux analysés dans les échantillons de lait. Zone A : site proche d'une station d'essence (moins de 5 Km), Zone B : site au-delà de 5 Km.**

Elément trace métallique	Concentration ( $\mu\text{g/Kg}$ )		Valeur du $p$ (Mann Whitney)
	Zone A (n=72)	Zone B (n=48)	
Plomb	32,14 $\pm$ 13,93 [13,23 – 57,27]	22,43 $\pm$ 10,52 [8,28 – 48,48]	< 0,001
Cadmium	0,979 $\pm$ 0,141 [0,230 – 1,190]	0,906 $\pm$ 0,210 [0,150 – 1,180]	< 0,001
Mercure	0,516 $\pm$ 0,159 [0,180 – 0,980]	0,484 $\pm$ 0,201 [0,170 – 1,020]	< 0,001
Nickel	17,274 $\pm$ 1,852 [14,840 – 20,710]	16,565 $\pm$ 2,159 [9,230- 20,320]	< 0,001

## F. Analyse statistique multivariée

### Analyse de corrélation pour les métaux dans le lait de chamelle

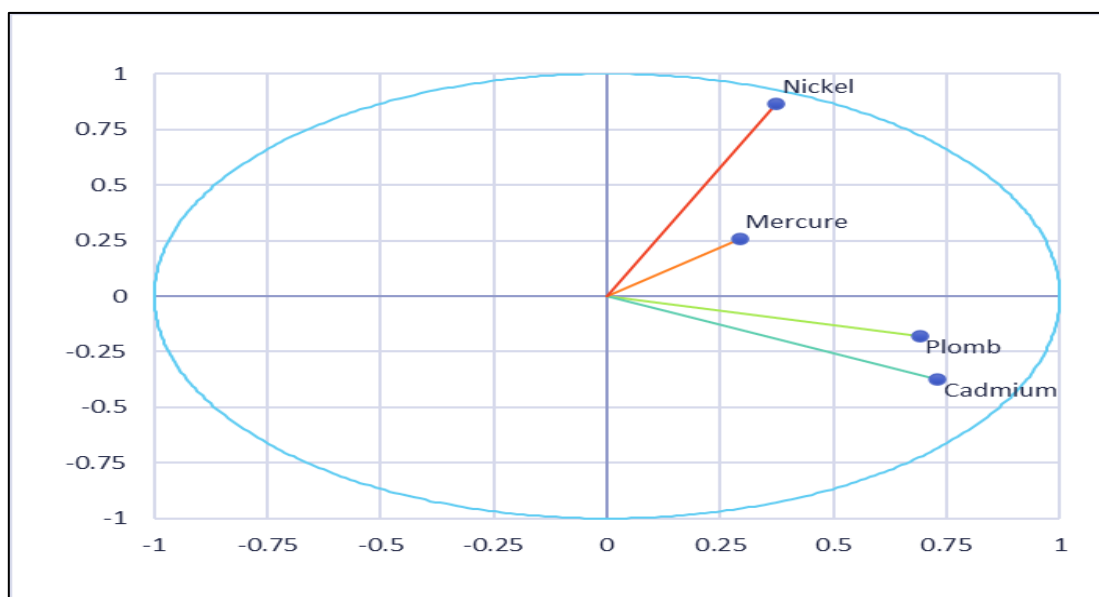
Les résultats du coefficient de corrélation de Pearson des métaux (Pb, Cd, Ni, Hg) pour les échantillons de lait de chamelle sont présentés dans le Tableau 84. Une corrélation positive existe entre tous les métaux analysés, notamment le Plomb et le Cadmium, ou la valeur est significative.

**Tableau 84. Corrélation entre les métaux pour les échantillons de lait.**

Variables	Plomb	Cadmium	Mercure	Nickel
<b>Plomb</b>	<b>1</b>			
<b>Cadmium</b>	<b>0,192</b>	<b>1</b>		
<b>Mercure</b>	-0,052	0,123	<b>1</b>	
<b>Nickel</b>	0,101	0,009	0,039	<b>1</b>

### Analyses en composantes principales pour le lait

Pour vérifier la corrélation entre les métaux dans le lait, une analyse en composantes principales a été appliquée. Selon les résultats des données, un modèle factoriel a été sélectionné qui explique 57,17% de la variance totale (1<sup>er</sup> axe 30,89%, 2<sup>eme</sup> axe 26,28%) (Figure 34). Le modèle consiste en un couple proportionnel Plomb–Cadmium corrélé négativement avec le couple Nickel-Mercure, ce qui correspond aux résultats de la corrélation de Pearson.



**Figure 34. Analyse en composantes principales avec représentations de rotation pour les métaux dans le lait de chamelle.**

## II.4. Corrélation entre les différentes matrices (sol, eau d'abreuvement, plantes et lait)

### II.4.1. Interaction du Plomb

#### A. Analyse de corrélation

Les résultats du coefficient de corrélation de Pearson des différentes matrices (eau d'abreuvement, sol, lait, plantes) pour le Plomb sont présentés dans le Tableau 85.

Une corrélation positive a été retrouvée entre le Plomb dans le lait de chamelle, le sol et dans les plantes. Les teneurs dans les plantes sont significativement dépendantes des teneurs dans l'eau et dans le sol, indiquant le transfert du métal de ces matrices vers les plantes et le lait. Par contre, il n'y a pas de corrélation du même type dans les sols et dans l'eau d'abreuvement.

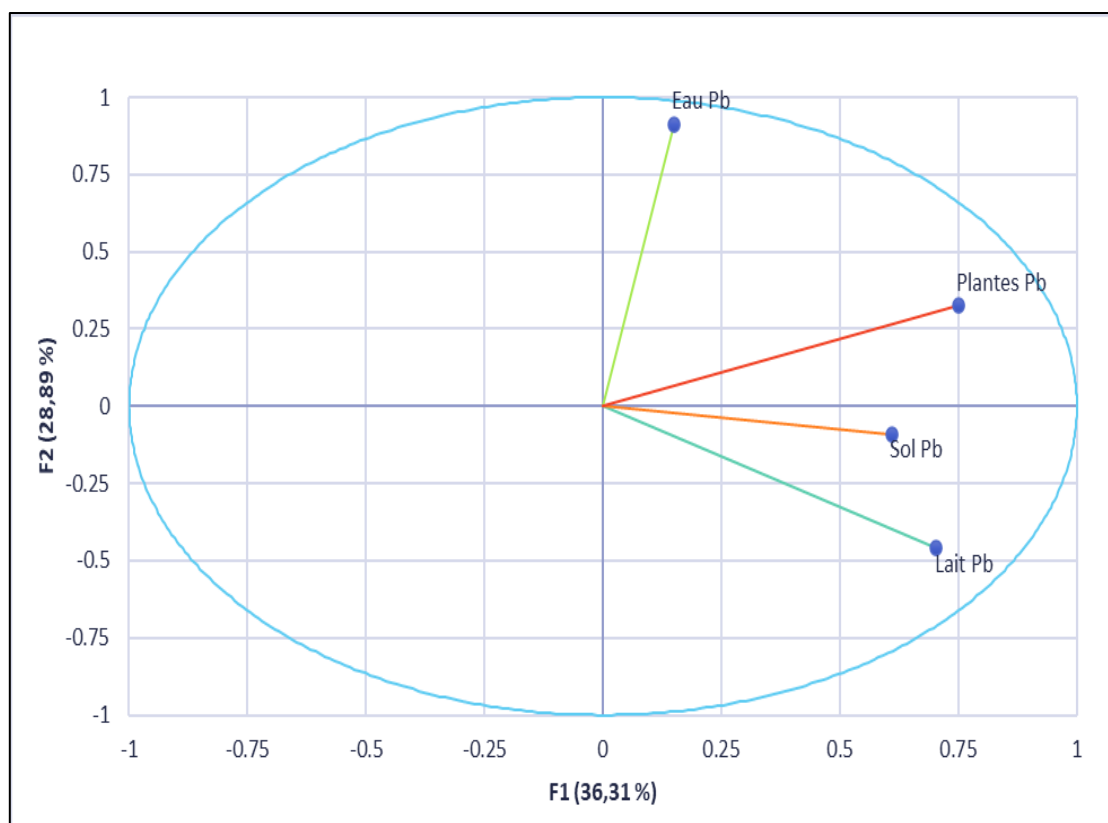
**Tableau 85. Corrélation entre les différentes matrices pour le Plomb.**

Variables	Eau	Lait	Sol	Plantes
Eau	1			
Lait	-0,160	1		
Sol	0,028	<b>0,207</b>	1	
Plantes	<b>0,218</b>	<b>0,289</b>	0,169	1

#### B. Analyses en composantes principales du Plomb

Selon les résultats de l'ACP, un modèle factoriel a été sélectionné qui explique 65,20% de la variance totale (Figure 35). Il apparaît que les concentrations en Plomb dans le lait et le sol sont significativement corrélées entre elles ainsi que celle des plantes. Cependant une corrélation négative est à noter entre les concentrations dans l'eau d'abreuvement et le lait.





**Figure 35. Analyse en composantes principales avec représentations de rotation pour les concentrations de Plomb.**

#### II.4.2. Interaction du Cadmium

##### A. Analyse de corrélation

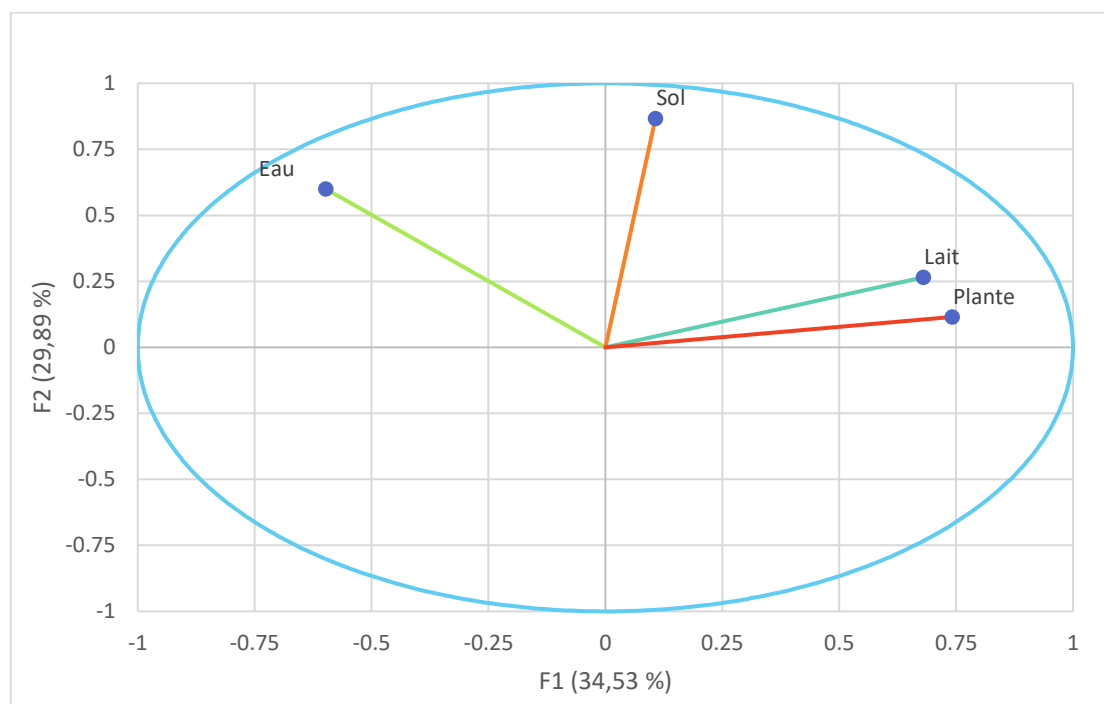
Pour le Cadmium, une corrélation positive a été observée pour la matrice du lait, des plantes et du sol, comme pour le Plomb (Tableau 86). Les teneurs du Cadmium dans l'eau d'abreuvement sont négativement dépendantes de celle du lait et du sol, indiquant une absence d'interaction entre ces matrices.

**Tableau 86. Corrélation entre les différentes matrices pour le Cadmium.**

Variables	Eau	Lait	Sol	Plante
<b>Eau</b>	<b>1</b>			
<b>Lait</b>	-0,141	<b>1</b>		
<b>Sol</b>	-0,206	0,129	<b>1</b>	
<b>Plante</b>	0,207	0,217	0,103	<b>1</b>

### B. Analyses en composantes principales du Cadmium

Selon les résultats des données, un modèle factoriel a été sélectionné qui explique 64,42% de la variance totale (Figure 36). Il apparaît que les concentrations en Cadmium dans le lait, le sol et les plantes sont corrélées entre elles.



**Figure 36. Analyse en composantes principales avec représentations de rotation pour les concentrations de Cadmium.**

### II.4.3. Interaction du Nickel

#### A. Analyse de corrélation

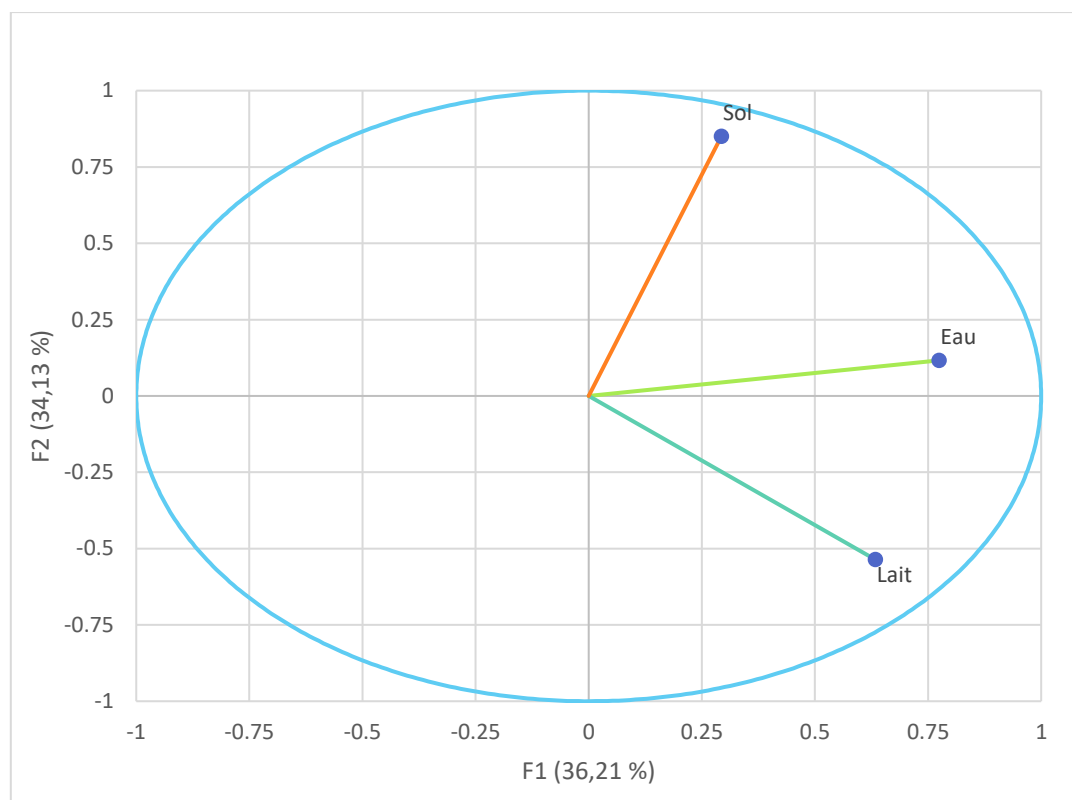
Les résultats du coefficient de corrélation de Pearson des différentes matrices (eau d'abreuvement, sol, lait) pour le Nickel sont présentés dans le Tableau 87. Une faible corrélation positive a été rencontrée pour la matrice du lait et l'eau d'abreuvement. Cependant cette relation était non significative ( $p > 0,05$ ).

**Tableau 87. Corrélation entre les différentes matrices pour le Nickel.**

Variables	Eau	Lait	Sol
Eau	1		
Lait	0,080	1	
Sol	0,054	-0,026	1

### B. Analyses en composantes principales du Nickel

Pour vérifier la corrélation entre les différentes matrices, une analyse en composantes principales a été appliquée. Selon les résultats des données, un modèle factoriel a été sélectionné qui explique 70,34% de la variance totale (Figure 37).



**Figure 37. Analyse en composantes principales avec représentations de rotation pour les concentrations de Nickel.**

## II.5. Analyse de la contamination métallique et de ses implications

### II.5.1. Évaluation des facteurs de transfert entre les différentes matrices

Le facteur de transfert est un indice utilisé pour évaluer le potentiel de transfert d'un métal du sol aux plantes et des plantes au lait. Le Tableau 88 résume les résultats statistiques descriptifs pour le facteur de transfert « FT<sub>sp</sub> et FT<sub>pl</sub> » du Plomb et Cadmium.

Les FT des métaux du sol aux plantes variaient entre 0,173 (Pb) et 0,664 (Cd). La valeur moyenne arithmétique du FT<sub>sp</sub> pour le Cadmium était significativement supérieure à celles du Plomb, ce qui montre que le Cadmium est beaucoup plus facilement transféré du sol aux plantes.

**Tableau 88. Statistiques descriptives des facteurs de transfert du Plomb et Cadmium pour le sol-plantes (FT<sub>sp</sub>) et plantes-lait (FT<sub>pl</sub>).**

Variables	Valeurs	Plomb	Cadmium
FT <sub>sp</sub>	Moyenne arithmétique ± écart type	0,180±0,112	0,862±0,884
	Plage de concentrations	[0,031 – 0,452]	[0,201 – 5,479]
	Médiane	0,173	0,664
FT <sub>pl</sub>	Moyenne arithmétique ± écart type	0,006±0,005	0,0268±0,0229
	Plage de concentrations	[0,001-0,026]	[0,0068-0,0870]
	Médiane	0,004	0,0151

## II.5.2. Évaluation probabiliste des risques pour la santé

### A. Estimation de la consommation quotidienne des métaux ingérés

Sur la base du modèle d'évaluation des risques pour la santé suggérée par l'US-EPA, les valeurs EDI (mg/Kg/jour) pour les groupes d'adultes et d'enfants sont présentées dans le Tableau 89. L'apport quotidien en Plomb a varié selon les sites, avec une fourchette de  $[1,18 \times 10^{-5} - 8,180 \times 10^{-5}]$  mg/Kg/jour pour les adultes et  $[4,60 \times 10^{-5} - 3,18 \times 10^{-4}]$  mg/Kg/jour pour les enfants.

**Tableau 89. Apports journaliers estimés des éléments détectés dans le lait par rapport à leurs apports journaliers tolérables provisoires (DJTP).**

Elément métallique	DJTP mg/Kg/day	EDI (mg/Kg/jour)		Valeur du <i>p</i> (test.t)
		Adultes	Enfants	
Plomb	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-4} \pm 5,51 \cdot 10^{-5}$ [3,55.10 <sup>-5</sup> – 2,45.10 <sup>-4</sup> ]	$4,39 \cdot 10^{-4} \pm 2,14 \cdot 10^{-4}$ [1,38.10 <sup>-4</sup> – 9,55.10 <sup>-4</sup> ]	< 0,001
Cadmium	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$4,05 \cdot 10^{-6} \pm 7,18 \cdot 10^{-7}$ [6,43.10 <sup>-7</sup> – 5,10.10 <sup>-6</sup> ]	$1,58 \cdot 10^{-5} \pm 2,79 \cdot 10^{-6}$ [2,50.10 <sup>-6</sup> – 1,98.10 <sup>-5</sup> ]	< 0,001
Mercure	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,16 \cdot 10^{-6} \pm 7,59 \cdot 10^{-7}$ [7,92.10 <sup>-7</sup> – 4,37.10 <sup>-6</sup> ]	$8,39 \cdot 10^{-6} \pm 2,95 \cdot 10^{-6}$ [2,83.10 <sup>-6</sup> – 1,70.10 <sup>-5</sup> ]	< 0,001
Nickel	1,00	$7,22 \cdot 10^{-5} \pm 8,84 \cdot 10^{-6}$ [3,96.10 <sup>-5</sup> – 8,88.10 <sup>-5</sup> ]	$2,81 \cdot 10^{-4} \pm 3,44 \cdot 10^{-5}$ [1,54.10 <sup>-4</sup> – 3,45.10 <sup>-4</sup> ]	< 0,001

Concernant l'apport quotidien en métaux par ingestion, pour chaque métal, l'exposition alimentaire a varié dans l'ordre suivant : EDI enfants > EDI adultes comme le montre le test de Student ( $p < 0,001$ ). Les valeurs EDI variaient comme suit : Plomb > Nickel > Cadmium > Mercure, avec une exposition alimentaire maximale de  $9,65 \times 10^{-4}$  mg de Plomb par jour pour les enfants. Les apports quotidiens et hebdomadaires moyens en Plomb, Cadmium et Mercure via la consommation de lait étaient inférieurs aux valeurs de référence et aux doses journalières tolérables provisoires. Cependant, certains échantillons de lait dépassaient la limite du Plomb.

### B. Estimation du risque non cancérogène et de l'indice de danger

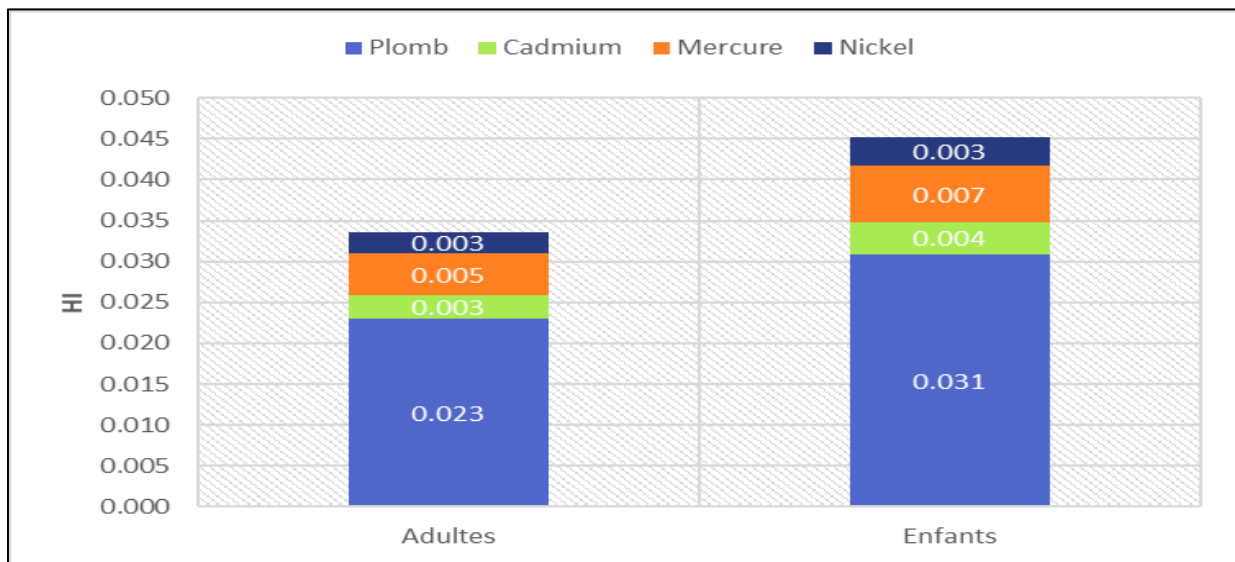
Le risque non cancérogène du Plomb, Cadmium, Mercure et Nickel pour les consommateurs de lait de chamelle a été déterminé en calculant la valeur du quotient de danger. Les HQ pour le Plomb, Cadmium, Mercure et Nickel pour la consommation de lait dans la zone étudiée pour les adultes et les enfants sont présentés dans la Tableau 90. Les valeurs HQ étaient inférieures à 1 pour les adultes et les enfants. Cependant, les résultats des valeurs de HQ ont indiqué que les jeunes consommateurs de lait sont plus exposés à un risque potentiel pour la santé par rapport aux adultes.

**Tableau 90. Valeurs HQ pour les métaux étudiés suite à la consommation de lait de chamelle.**

Elément trace métallique	HQ		Valeur du $p$ (test.t)
	Adultes	Enfants	
Plomb	0,023±0,011 [0,007– 0,050]	0,031±0,011 [0,010– 0,067]	< 0,001
Cadmium	0,0029±0,0005 [0,0005– 0,0036]	0,0039±0,0007 [0,0006– 0,0049]	< 0,001
Mercure	0,005±0,002 [0,002– 0,010]	0,007±0,002 [0,002– 0,014]	< 0,001
Nickel	0,0021±0,0003 [0,0011– 0,0026]	0,0035±0,0004 [0,0019– 0,0043]	< 0,001
Indice de danger (HI)	0,034	0,045	

Les HQ moyens calculés pour la consommation de lait ont diminué dans l'ordre suivant :  $HQ_{Pb} > HQ_{Hg} \geq HQ_{Cd} \geq HQ_{Ni}$  pour tous les groupes de population étudiés. Les risques pour la santé étaient dans l'ordre suivant : enfants > adultes. Le test de Student a montré qu'il y avait une différence significative dans le quotient de risque ( $p = 0,001$ ).

L'indice de danger non cancérigène (HI) calculé était inférieur à 1 pour les groupes de population étudiés, ce qui indique que la consommation de lait ne présente pas de risque pour la santé humaine. L'élément qui a le plus contribué au HI dans la majorité des échantillons est le Plomb (Figure 38). Le HI était environ deux fois plus élevé pour les enfants que pour les adultes, ce qui suggère que si plus de types de catégories d'aliments contaminés sont consommés, le risque peut augmenter de manière significative.



**Figure 38. Contribution de chaque métal à l'indice de danger par groupe de population.**

#### D. Estimation du risque cancérigène pour le Plomb et le Cadmium

Le Tableau 91 présente les caractéristiques descriptives du risque cancérigène issu de l'ingestion de lait de chamelle par les enfants et les adultes.

Les valeurs moyennes du risque cancérigène pour le lait contaminé au Plomb étaient inférieures à  $10^{-6}$  alors que pour le Cadmium elles étaient supérieures à cette valeur indiquant un risque cancérigène potentiel lié à la consommation de lait dans la région par la présence du Cadmium. Le Cadmium s'est avéré être le contributeur le plus élevé au risque total de cancer pour tous les groupes de population dans la région d'étude.

Tableau 91. Risque cancérigène et le risque cancérigène total calculés.

	RC <sub>Pb</sub>	RC <sub>Cd</sub>	RCT	
<b>Adultes</b>	<b>Moyenne arithmétique ± écart type</b>	$6,83.10^{-7} \pm 3,34.10^{-7}$	$4,33.10^{-5} \pm 7,67.10^{-6}$	$4,35.10^{-5} \pm 7,69.10^{-6}$
	<b>Plage de concentrations</b>	$[2,15.10^{-7} - 1,49.10^{-6}]$	$[6,78.10^{-6} - 5,45.10^{-5}]$	$[6,99.10^{-6} - 5,49.10^{-5}]$
	<b>Médiane</b>	$5,61.10^{-7}$	$4,49.10^{-5}$	$4,50.10^{-5}$
	<b>Moyenne arithmétique ± écart type</b>	$9,91.10^{-7} \pm 4,49.10^{-7}$	$5,83.10^{-5} \pm 1,03.10^{-5}$	$5,86.10^{-5} \pm 1,04.10^{-5}$
<b>Enfants</b>	<b>Plage de concentrations</b>	$[2,89.10^{-7} - 2,00.10^{-6}]$	$[9,25.10^{-6} - 7,34.10^{-5}]$	$[9,41.10^{-6} - 7,39.10^{-5}]$
	<b>Médiane</b>	$7,55.10^{-7}$	$6,04.10^{-5}$	$6,06.10^{-5}$

# Chapitre III

## Discussion



Comme évoqué lors de la revue systématique effectuée, les métaux lourds peuvent se retrouver dans le lait de chamelle, comme en témoignent diverses études menées à travers le monde. Cependant, il est important de noter qu'en Algérie, aucune étude approfondie n'a été réalisée pour évaluer la concentration de métaux ni pour comprendre comment le micro-environnement des élevages influe sur la qualité du lait produit par les animaux. C'est dans cette optique que la présente discussion se propose d'apporter des éléments de réponse.

### III.1. Validation analytique des méthodes de dosage des métaux

Afin de s'assurer que la méthodologie analytique utilisée lors de nos dosages fournit des données fiables, une validation analytique a été effectuée. Les paramètres analytiques évalués étaient la spécificité, la linéarité, la précision, l'exactitude, la limite de détection, la limite de quantification et la justesse.

Le choix de l'intervalle de mesure pour les éléments analysés dans chaque matrice est basé sur des considérations réglementaires (exemple : la norme réglementaire du Plomb dans le lait est de  $20\mu\text{g/Kg}$  et est comprise dans l'intervalle de validation  $[5-30]\mu\text{g/Kg}$ , ou encore la norme réglementaire du Cadmium dans l'eau est de  $5\mu\text{g/l}$  et représente le niveau 100% du domaine de validation du Cadmium dans l'eau). Ces valeurs ont été sélectionnées conformément aux normes et recommandations internationales en matière de sécurité alimentaire, tenant compte des seuils établis par les autorités sanitaires et les organisations compétentes [176]. De plus, l'intervalle de mesure a été déterminé afin de couvrir une plage représentative des concentrations potentielles dans les échantillons, permettant ainsi une évaluation exhaustive des risques sanitaires.

La technique utilisée au cours de notre travail est la spectrométrie d'absorption atomique avec four à graphite (SAA-FG). Cette technique est largement utilisée pour la quantification des métaux dans diverses matrices biologiques, environnementales ou alimentaires en raison de sa sélectivité et de sa sensibilité [209,210]. Cependant, cette technique n'est pas dépourvue de défis qui sont liés à des problèmes tels qu'une atomisation incomplète due à des interférences, des niveaux élevés de bruit de fond, une volatilisation de l'analyte, ainsi que la formation de résidus carbonés. Ces facteurs peuvent entraîner des variations dans les taux d'atomisation, voire une occlusion partielle du rayon lumineux. Pour atténuer ces effets, il est recommandé d'utiliser un modificateur de matrice, une intégration du signal d'absorbance et un système de correction d'absorbance [244].

Les modificateurs de matrice jouent un rôle essentiel en atténuant les interférences et le bruit de fond, en conférant une stabilité thermique accrue aux composés à analyser, même à des températures de décomposition plus élevées [244].

Nous avons choisi une validation selon la méthode de l'étalonnage externe pour la quantification des métaux (Pb, Cd, Ni) car elle représente une méthode plus rapide, plus simple et aussi économique en raison de la réduction du nombre d'analyses à effectuer [209,210].

Notre méthode était sensible et adaptée à la quantification du Plomb, Cadmium et Nickel dans les échantillons de lait de chamelle cru. Les limites de détection et de quantification obtenues pour étaient respectivement de 0,41 et 1,37 $\mu\text{g}/\text{Kg}$  pour le Plomb, 0,16 et 0,87 $\mu\text{g}/\text{Kg}$  pour le Cadmium. Les résultats étaient cohérents avec ceux trouvés dans la littérature : Lara., (2008) dans son étude du lait maternel a obtenu une LD de 0,92 $\mu\text{g}/\text{Kg}$  et une LQ de 3,07 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ . Quant à Kazi et al., (2009) ils ont trouvé une LD de 0,50 $\mu\text{g}/\text{Kg}$  et une LQ de 1,60 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ , en utilisant la méthode de minéralisation assistée par micro-ondes [265,266].

Les valeurs des RSD retrouvées ne dépassaient pas le 15% dans la majorité des procédures de validation effectuée. À titre d'exemple pour le Plomb, les valeurs de RSD trouvées étaient de 6,39%, 10,50% et 6,35% pour les échantillons dopés avec des concentrations de 5,00, 10,00 et 30,00  $\mu\text{g}/\text{Kg}$ , respectivement. Comme les valeurs RSD se situaient dans la plage recommandée, les méthodes se sont avérées avoir une bonne répétabilité.

Le recouvrement moyen des méthodes analytiques était compris entre 97,72 et 102,77%. Dans la littérature des recouvrements entre 102 et 109% ont été reportés pour la validation du dosage du Plomb dans le lait par la méthode de l'étalonnage externe [265,267,268].

Les résultats des tests de performance du dosage du Mercure dans l'eau et dans le lait indiquent des paramètres de validation acceptables. En ce qui concerne la linéarité, les plages de concentration étudiées pour l'eau et le lait ont été bien définies ([0,50-2,00]  $\mu\text{g}/\text{l}$  pour l'eau et [0,50-3,00]  $\mu\text{g}/\text{Kg}$  pour le lait), démontrant une réponse satisfaisante de la méthode dans ces intervalles.

Sur la base des résultats obtenus dans cette étude et ceux retrouvés dans la littérature, nous pouvons affirmer que notre méthode d'analyse des métaux dans les échantillons de lait est efficace et montre une précision adéquate permettant de générer des données fiables.

Cependant, nous devons mettre en évidence que notre validation analytique comprenait des limites comme l'absence de matériaux de référence certifiés pour les matrices analysées. Pour pallier à ce défi, nous avons choisi l'ajout délibéré de concentrations connues de métaux afin d'évaluer la performance de notre méthode analytique.

Ces échantillons de contrôle qualité ont été traités de manière identique aux échantillons réels tout au long du processus analytique.

### III.2. Analyse environnementale et spatiale des élevages de l'étude

Les indices de pollution de chaque élevage ont donné la possibilité d'estimer un niveau de pollution selon la situation géographique et la distance aux différentes sources de pollution. L'indice de pollution a varié d'une valeur de 3 à 8 avec une valeur moyenne de 5, indiquant une pollution faible à moyenne pour les élevages échantillonnés.

La région que nous avons étudiée est moyennement industrialisée, principalement par les industries pétrolières (chimie et pétrochimie) situées dans la région de Hassi Messaoud (80Km de Ouargla) et des briqueteries implantées dans la zone industrielle de Touggourt. Ces zones peuvent participer à la pollution des micro-environnements des élevages intensifs situés dans la bordure des routes. De plus, il convient de noter que les industries situées autour des agglomérations peuvent également contribuer à une pollution significative. Au regard de nos résultats, cet index s'est avéré intéressant pour évaluer les risques de pollution dans les sols, mais limité pour les autres matrices (plantes, eau d'abreuvement et lait) [269].

Avec l'identification des sources de pollution autour de chaque élevage étudié, nous avons pu estimer quel type de polluant et quel niveau potentiel de contamination s'attendre dans chaque échantillon.

À titre d'exemple, les élevages 7 (GPS : 33°17'07.3"N 6°01'45.1"E) et 8 (GPS : 32°55'56.8"N 5°55'37.3"E) qui sont à proximité de stations d'essence peuvent recevoir de quantités de Plomb au niveau du sol par dépôt atmosphérique, du fait de la proximité de sources de pollution. L'intégration d'une analyse de l'air aurait indubitablement enrichi notre évaluation de la pollution, offrant ainsi une perspective plus complète sur les impacts des productions de pétrole et de gaz dans la région étudiée. En effet, étant donné que la majeure partie des déchets de ces industries est rejetée dans l'atmosphère, une analyse dédiée aurait fourni des données cruciales sur les composants chimiques présents dans l'air et leur potentiel impact sur les écosystèmes environnants. Cette approche aurait également contribué à déterminer dans quelle mesure les dépôts atmosphériques, évalués dans notre étude, pouvaient être attribués aux sources industrielles majeures, apportant ainsi une clarté supplémentaire quant à l'origine des contaminants dans les élevages étudiés.

La circulation automobile a également un effet important du fait de la proximité des élevages de type intensif de l'étude aux routes nationales. Cette circulation entraîne des retombées atmosphériques qui peuvent être importantes, comme ceci a été démontré dans une étude au Kazakhstan [139].

En outre, en considérant les conditions climatiques, en particulier l'influence du vent dans la région, on aurait pu mieux appréhender la dispersion des polluants. Les vents peuvent jouer un rôle crucial dans le déplacement des contaminants, potentiellement éloignant les dépôts atmosphériques des sources de pollution initiales. Cette compréhension accrue aurait permis de contextualiser davantage les résultats de l'étude, soulignant que la pollution mesurée pourrait représenter une fraction de l'impact total, et que des évaluations plus sophistiquées prenant en compte les facteurs météorologiques pourraient fournir une image plus précise des risques environnementaux et sanitaires dans la zone étudiée.

### **III.3. Concentrations des métaux au niveau des différentes matrices**

#### **III.3.1. Contamination métallique du sol**

##### **A. Concentration du Plomb dans le sol**

Basé sur la concentration moyenne arithmétique, les métaux ont été triés dans l'ordre décroissant suivant : Plomb > Nickel > Cadmium. Les concentrations de Plomb dans le sol ont varié considérablement à travers les dix élevages avec des valeurs allant de 25,97 à 67,41 mg/Kg et une moyenne de  $40,10 \pm 10,49$  mg/Kg.

Les concentrations retrouvées ont été, pour la majorité, largement plus élevées que la valeur de fond du Plomb de la région (15 mg/Kg) et avaient un coefficient de variabilité relativement élevé (68,10%). D'après la littérature, les sols affectés par des sources anthropiques ont un coefficient de variabilité élevé [270,271]. Par conséquent, les concentrations de Plomb dans les sols aux alentours des élevages étudiés sont principalement influencées par des activités humaines plutôt que des sources naturelles.

Ces concentrations peuvent s'expliquer par la pollution issue des complexes industriels de raffinage du pétrole dans la région, l'incinération des déchets, le trafic automobile ainsi que la proximité des élevages étudiés aux routes nationales qui sont dans la majorité des cas à moins de 200m des routes principales [272-277].

Le Tableau 92 compare les concentrations de Plomb (mg/Kg) retrouvées dans notre étude avec celles de différentes régions du monde et d'Algérie. La concentration moyenne retrouvée dans notre étude était plus faible que celles rapportées dans certaines grandes villes industrialisées à travers le monde (Naples [279], Séoul [280], Madrid [281], Londres [282], Mexico [283]) ou encore Sétif [276] et Hassi Messaoud [278] en Algérie. Cependant nos résultats étaient similaires à ceux mesurés en Zagreb [284], Constantine [215] et Touggourt [202].

**Tableau 92. Comparaison des concentrations du Plomb (mg/Kg) de notre étude avec les sols de différentes régions.**

Ville	Concentration moyenne (mg/Kg)	Année	Référence
Londres (Grande Bretagne)	294	1991	[282]
Bangkok (Thaïlande)	47,8	1998	[286]
Madrid (Espagne)	161	1998	[283]
Seoul (Corée du Sud)	240	1998	[280]
Naples (Italie)	262±337	2003	[279]
Zagreb (Croatie)	25,9	2003	[284]
Mexico (Mexique)	140,5	2009	[283]
Constantine (Algérie)	31±14	2013	[285]
Hong Kong (Chine)	94,60	2014	[287]
Hassi Messaoud (Algérie)	130,97	2016	[288]
Etats unis d'Amérique	219	2019	[289]
Sétif (Algérie)	67,70	2020	[276]
Touggourt (Algérie)	40,21±13,47	2021	[202]
Notre étude	40,10±10,49	2022	/

Une variation non significative a été observée entre les différents élevages selon la proximité des stations d'essence ( $p=0,623$  ; élevages à moins de 5 km des stations vs élevages plus éloignés), cependant les concentrations étaient plus élevées dans les zones les plus proches des stations d'essence. Une étude dans la ville de Sétif a montré des teneurs de Plomb élevées dans les zones proches des stations d'essence par rapport aux zones plus éloignées [276].

Même si l'utilisation de Plomb tétraéthyle a été interdite en Algérie, le niveau du Plomb dans le sol peut rester élevé pendant plusieurs années du fait de sa faible biodégradabilité, ce qui pourrait expliquer les teneurs relativement élevées dans les élevages à proximité des stations d'essence [280].

Dans la littérature, ce sont surtout les facteurs liés à la proximité des routes, des aéroports et des usines polluantes qui sont le plus souvent mentionnés. Ainsi, les endroits situés près des autoroutes à fort trafic apparaissent plus pollués par les métaux lourds comme le Plomb et le Cadmium [291].

Les productions du pétrole et gaz et les sites de raffinage ont une grande influence sur la pollution de l'écosystème avec 75% des déchets qui passent dans l'air, 20% dans l'eau et 5% dans le sol [139]. Le Plomb peut également être transporté sur de longues distances par les vents et les précipitations, entraînant une contamination dans des zones éloignées des sources d'émission [291-294].

Le test de Friedman a été utilisé pour évaluer l'influence des saisons sur la concentration du Plomb dans le sol. Le test a révélé une différence non significative au fil des saisons, avec une valeur de  $p > 0,05$ . Cependant, la concentration moyenne était plus élevée pendant la saison du printemps ( $42,76 \pm 11,66$  mg/Kg) car elle est caractérisée par des vents de sable importants qui peuvent aller jusqu'à 100 Km/h [295].

Dans les zones désertiques, les conditions météorologiques jouent un rôle important dans la distribution des polluants pendant la saison du printemps par rapport aux autres saisons par plusieurs facteurs :

- L'érosion du sol : la saison du printemps est souvent caractérisée par des vents violents qui peuvent causer une érosion. Ceci peut libérer le Plomb qui était autrefois emprisonné dans les roches et entraîner une augmentation de sa concentration dans le sol [296].
- Les activités humaines : les activités telles que les travaux routiers peuvent également augmenter la concentration de Plomb dans le sol. La saison du printemps est souvent une période où ces activités sont plus fréquentes.
- La migration des polluants : les vents forts peuvent transporter des polluants sur de longues distances et les déposer sur le sol. En conséquence, la concentration de Plomb dans le sol peut augmenter pendant la saison du printemps [296].

### **B. Concentration du Cadmium dans le sol**

Les valeurs de Cadmium obtenues dans le sol ont été contenues dans un intervalle allant de 0,15 à 2,66mg/Kg avec une moyenne arithmétique de  $0,93 \pm 0,68$ mg/Kg. Dans certains sites, les concentrations étaient plus élevées que la valeur de fond du Cadmium (0,5mg/Kg).

Kabata-Pendias., (2000) et Alloway., (1995) ont indiqué que les concentrations de Cadmium ne dépassent pas 1,00mg/Kg pour la plupart des sols de surface dans le monde [145,297]. Selon nos résultats, 52% (n=19) des échantillons ont une concentration inférieure à cette valeur. De plus, nos résultats ont présenté un coefficient de variabilité élevé (71,5%). En conséquence, tout comme pour le Plomb, les concentrations en Cadmium ont tendance à être plus affectés par les sources anthropiques que naturelles.

La littérature rapporte également que les concentrations de Cadmium dans le sol proviennent généralement des dépôts atmosphériques [298]. Les apports de Cadmium dans les sols peuvent aussi avoir d'autres origines (amendements agricoles, boues d'épuration). L'absence de concentrations élevées suggère que les engrais phosphatés riches en Cadmium n'ont pas été intensivement utilisés jusqu'à présent dans la région [145].

Cependant, il convient de noter que même des niveaux faibles de Cadmium au sol peuvent avoir des effets négatifs sur la santé humaine et les écosystèmes à long terme du fait de sa faible biodégradabilité et de sa grande toxicité. En effet, sa demi-vie dans le sol varie de 15 à 1100 ans ce qui en fait un métal faiblement biodégradable [299-301].

La concentration moyenne de Cadmium dans le sol était plus élevée pendant la saison du printemps. Les conditions météorologiques jouent, théoriquement (comme pour le Plomb), un rôle important dans la distribution des polluants pendant la saison du printemps dans les zones désertiques. Cependant, aucune variation significative n'a été observée avec les autres saisons. Les concentrations les plus élevées ont été retrouvées dans les élevages 7 (GPS : 33°17'07.3"N 6°01'45,1"E) et 8 (GPS : 32°55'56.8"N 5°55'37,3"E), proches respectivement des villes de Touggourt et de Ouargla.

### **C. Concentration du Nickel dans le sol**

Les concentrations de Nickel dans le sol ont varié de 18,27 à 39,67mg/Kg avec une valeur moyenne de  $27,59 \pm 6,09$ mg/Kg. Nos résultats sont similaires aux concentrations retrouvées dans une étude précédente dans la région de Hassi Messaoud ( $35,78 \pm 17,73$ mg/Kg) [240].

La répartition spatiale du Nickel est différente de celle du Plomb et du Cadmium. Le modèle de distribution présente une plus faible variabilité et les concentrations sont relativement uniformes (coefficient de variabilité : 43,76%). De plus, la concentration moyenne était comparable à la valeur de fond du métal (25mg/Kg). Benhaddya et al., (2014) ont rapporté que la source majeure du Nickel dans le sol du sud de l'Algérie peut être due à la présence de roches riches en Nickel dans la région.

Aucune différence significative n'a été observée pour la concentration du Nickel en fonction des saisons ou de la distance des stations d'essence. Ceci confirme que les concentrations de Nickel dans les sols sont probablement issues d'une source naturelle plutôt que des sources anthropiques et sont stables et constantes dans le temps et dans l'espace [240].

#### **D. Corrélation entre les métaux dans le sol**

Pour étudier la relation entre les métaux analysés dans le sol, l'analyse de corrélation de Kendall a été appliquée (Tableau 69). La matrice de corrélation a indiqué une corrélation positive et statistiquement significative entre le Cadmium et le Plomb ( $r=0,604$ ). Nos résultats sont similaires à ceux obtenus par Malik et al., (2010), Sun et al., (2015) et Yaylalı-Abanuz., (2012). Ces auteurs ont montré que le Plomb et le Cadmium sont significativement et positivement corrélés et qu'ils sont dépendants des mêmes facteurs anthropiques tels que la production industrielle ou le trafic routier [302-304].

L'absence de corrélation du Nickel avec les deux autres métaux confirme que le Nickel est probablement issu d'une source naturelle et non anthropique [269]. Ce résultat est conforme aux études antérieures notamment dans la région de Hassi Messaoud qui a montré que le Nickel de cette région est d'origine naturelle [278,305].

#### **E. Indice de geoaccumulation et facteur de variabilité des métaux dans le sol**

Le sol peut passer dans l'organisme animal avec l'ingestion des plantes sous forme de petites particules de terre et par l'inhalation de l'air sous forme de poussières. Ainsi, le sol peut devenir la principale source de contamination par les métaux lourds pour les animaux, d'autant que certains herbivores ingèrent une part importante de sol dans leur ration, ainsi un dromadaire peut ingérer jusqu'à 3Kg de sol par jour [294,306].



Les indices de geoaccumulation pour chaque métal dans le sol ont été de 0,55 à 1,38 pour le Plomb, -1,27 à 1,43 pour le Cadmium, -0,54 à 0,07 pour le Nickel. Les valeurs étaient variables de non polluées à moyennement polluées pour le Plomb qui était le polluant le plus important dans le sol des élevages échantillonnés. Pour le Cadmium, cinq élevages ont montré un Igeo inférieur à 0 (non pollué), trois ont montré un Igeo compris entre 0 et 1 et deux un Igeo supérieur à 1. Pour le Nickel, à l'exception d'un seul élevage, tous les échantillons étudiés avaient un Igeo inférieur à 0, ce qui indique que l'environnement n'est pas pollué par cet élément.

Les sources de cette pollution modérée sont probablement anthropiques et sont associées à la proximité des élevages aux routes, au trafic routier et aux stations d'essence et dans certains cas à des usines, comme démontré dans l'analyse spatiale.

En général, les Igeo moyens en Plomb et Cadmium dans la zone proches des stations d'essence ont été plus élevées que dans les zones plus éloignées, tandis que ceux du Nickel étaient similaires. Cependant, la distribution spatiale des métaux analysés dans les sols a montré une différence non significative de l'impact de la proximité des stations d'essence pour tous les métaux ( $p > 0.05$ ). Selon la littérature, les concentrations des polluants dans le sol dépendent de l'intensité du trafic, de la morphologie de la zone, des conditions météorologiques locales et des propriétés du sol.

La littérature estime que plus de 95% du Plomb est susceptible de contaminer l'environnement par retombées atmosphériques aurait pour origine le trafic automobile. Les composés issus de la combustion automobile se déposent sur les chaussées ou à proximité (moins de 50m) et le reste est entraîné dans les couches supérieures de l'atmosphère [307]. Nos résultats suggèrent donc que la pollution anthropique est un facteur important contribuant à l'augmentation des concentrations du Plomb et du Cadmium dans le micro-environnement de chaque élevage de type intensif [308].

Les conditions climatiques jouent aussi un rôle important dans la présence des métaux dans les sols. La dispersion des particules de métaux par le vent est influencée par des facteurs tels que la vitesse et la direction du vent, ainsi que la taille et la densité des particules [309-313].

Les particules de métaux lourds peuvent être transportées sur de grandes distances par le vent, se déposant finalement et entraînant une contamination des sols durant la saison des vents forts [313]. D'un autre côté, les conditions de température peuvent influencer les processus de décomposition et de dégradation des contaminants dans le sol, ce qui peut affecter la mobilité et la disponibilité des métaux [295].

La teneur en métaux peut être également sous l'influence de facteurs propres aux sols tels que le pH ou la structure du sol. La taille des particules a une influence sur la distribution des métaux dans la matrice terrestre et leur disponibilité pour les plantes [314,315].

Les changements de concentrations de métaux dans les sols le long des routes sont souvent liés à la densité de la circulation automobile en particulier dans les zones urbaines et péri-urbaines [275]. Les véhicules peuvent émettre le Plomb, le Cadmium à partir des gaz d'échappement, des freins, des pneus et des peintures. Ces métaux peuvent s'accumuler dans les sols à proximité des routes, en particulier dans les zones où la circulation est dense et les véhicules roulent lentement [316]. Ainsi, la teneur maximale de Plomb et de Cadmium a été observée dans le sol de l'élevage 7 qui se situe à seulement 50m d'une route où le trafic automobile est moyennement important (annexe 2).

Dans une étude réalisée en Thaïlande, il a été montré que les concentrations moyennes du Plomb et du Cadmium dans le sol ont été de 183 et 2,57mg/Kg et de 70,64 et 2,25mg/Kg, pour les sites avec un volume de trafic élevé et faible, respectivement [317]. Une autre étude au Pakistan a révélé des variations significatives des concentrations de Plomb et de Cadmium dans le sol le long des routes principales et secondaires, liées à la densité du trafic routier [318].

La proximité des élevages aux industries polluantes peut être également un facteur de contamination. Les raffineries de pétrole peuvent avoir un impact sur la présence de métaux et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols environnants. Ces contaminants sont libérés dans l'air, l'eau et le sol, soit directement à partir des activités de raffinage, ou indirectement par le biais de dépôts atmosphériques [319-322].

Les stations d'essence contribuent également à la contamination des sols par les métaux. Les principales sources de contamination par les métaux dans les stations-service sont les fuites de carburant, les déversements lors du remplissage des réservoirs de stockage et les opérations de maintenance des véhicules. Les composants des carburants, tels que le plomb, le zinc et le cuivre, peuvent ainsi s'accumuler dans le sol et causer des effets néfastes sur l'environnement. Les mécanismes de transport des métaux dans les sols à partir des stations-service sont similaires à ceux du trafic routier. Les métaux se lient aux particules fines de poussière et peuvent être transportés sur de longues distances par le vent [322].

### III.3.2. Contamination métallique de l'eau d'abreuvement

La qualité physique, chimique et microbiologique de l'eau diffère d'un endroit à un autre en fonction des facteurs environnementaux et des lieux. La plupart des préoccupations concernant la détérioration de la qualité de l'eau sont liés à la présence de métaux toxiques comme, le Plomb, le Cadmium et les polluants organiques persistants [323-326].

La mauvaise qualité de l'eau d'abreuvement affecte la santé du troupeau en modifiant négativement l'apport alimentaire, l'équilibre des nutriments corporels et la production de lait. D'autre part, les agriculteurs ne prêtent pas beaucoup d'attention à la qualité de l'eau pour l'abreuvement des animaux, ce qui peut affecter l'état de santé des animaux. Les polluants présents dans l'eau peuvent s'accumuler dans le corps de l'animal, ce qui peut affecter la population humaine après consommation du lait contaminé. Par conséquent, une évaluation régulière de la qualité de l'eau peut réduire les risques pour la santé d'un troupeau laitier [327]. De plus la production du lait de chamelle dépend de la qualité de l'eau qui joue un rôle vital dans la fourniture de certains nutriments essentiels et les dromadaires adultes peuvent boire entre 90 et 120 litres d'eau en une seule fois [307].

#### A. Paramètres de potabilité de l'eau d'abreuvement

La turbidité des eaux d'abreuvement échantillonnées est de  $0,51 \pm 0,91$  unité de turbidité néphélométrique (UTN). La turbidité décrit le trouble de l'eau provoqué par des particules en suspension (par exemple, l'argile et les limons), des précipités chimiques (par exemple, le manganèse et le fer), des particules organiques (par exemple, des débris de plantes) et des organismes. La turbidité peut être due à la mauvaise qualité de l'eau de source. L'augmentation de la turbidité réduit la clarté de l'eau et donc la transmission de la lumière.

#### B. Concentration du Plomb dans l'eau d'abreuvement

Les concentrations du Plomb dans l'eau d'abreuvement ont varié de 1,73 à  $18,27 \mu\text{g/l}$ , avec une moyenne arithmétique de  $9,14 \pm 4,21 \mu\text{g/l}$ . 40% des échantillons ( $n=16$ ) avaient une concentration supérieure à la limite réglementaire algérienne pour l'eau destinée à la consommation humaine ( $10 \mu\text{g/l}$ ) [328]. Selon l'OMS, les concentrations du Plomb dans l'eau de boisson sont généralement inférieures à  $5 \mu\text{g/l}$ , bien que des concentrations nettement plus élevées aient été mesurées à travers le monde [329,330]. Nos résultats révèlent que les eaux étaient certes impropres à la consommation humaine, mais sont exemptes d'un enrichissement significatif provenant de sources anthropiques.

Les données concernant les effets et la concentration du Plomb dans les plantes, les animaux ou l'eau sont limitées dans notre région d'étude (Sud de l'Algérie). Cependant nos résultats sont inférieurs à ceux retrouvés dans un travail préliminaire dans la région de Touggourt ( $13,38 \pm 5,57 \mu\text{g/l}$ ) et qui s'est également intéressé à la qualité de l'eau d'abreuvement [313].

Au niveau mondial, dans l'oasis d'Al-Ahssa (Arabie Saoudite), les concentrations en Plomb observées ont été  $8 \pm 5 \mu\text{g/l}$  dans les échantillons d'eau souterraine et  $91 \mu\text{g/l}$  dans les eaux résiduelles servant comme eau d'abreuvement [331]. Au Kazakhstan, les teneurs du Plomb étaient comprises entre 5,9 et  $13,6 \mu\text{g/l}$  pour l'eau d'abreuvement distribué aux chamelles [139]. Lors de nos campagnes d'échantillonnage, nous avons remarqué que l'eau d'abreuvement était entreposée dans des barils rouillés (Figure 10, Page 70). L'utilisation d'un baril rouillé pour stocker de l'eau peut être une source de préoccupation en termes de sécurité sanitaire. En effet, la rouille peut être le signe de la corrosion du métal du baril, qui peut contenir des métaux tels que le Plomb. Lorsque l'eau est stockée dans un tel baril, les métaux peuvent se dissoudre dans l'eau et augmenter la concentration des différents contaminants métalliques.

Contrairement aux sols, nos résultats ont révélé que la pollution était considérablement plus élevée dans les zones adjacentes aux stations d'essence ( $p < 0,05$ , Mann-Whitney test). Les élevages 6 (GPS :  $33^{\circ}17'07.3''\text{N } 6^{\circ}01'45.1''\text{E}$ ) et 7 (GPS :  $32^{\circ}55'56.8''\text{N } 5^{\circ}55'37.3''\text{E}$ ) qui se situent à proximité de stations-service, ont été les plus touchés par la contamination du Plomb.

### C. Concentration du Cadmium dans l'eau d'abreuvement

Les concentrations du Cadmium ont varié entre 0,14 et  $1,01 \mu\text{g/l}$ , avec une moyenne arithmétique de  $0,41 \pm 0,24 \mu\text{g/l}$ . Selon l'OMS, les niveaux dans l'eau de boisson sont habituellement inférieurs à  $1 \mu\text{g/l}$  [328]. L'eau était faiblement contaminée par le Cadmium avec des niveaux inférieurs aux niveaux autorisés. Cependant cette contamination était plus importante dans les élevages proches des stations d'essence comme pour le cas du Plomb.

En Arabie Saoudite, les concentrations de Cadmium dans les puits d'eau potable de 10 villes se situaient entre 2 et  $10 \mu\text{g/l}$ . Ces résultats supérieurs à la réglementation ont été attribués à la guerre du Golfe et aux feux de pétrole dans la région [332]. Au Lagos, Nigeria, une étude a signalé que 32,7% des échantillons de puits d'eau potable présentaient des niveaux de Cadmium supérieurs aux valeurs indicatives [333].

De leur côté, Gowd et Govil., (2008) ont signalé une concentration moyenne de  $51,1 \mu\text{g/l}$  dans les eaux de surface de la zone industrielle de Ranipet, Inde qui a été attribuée aux effluents d'eaux usées industrielles et/ou au déversement de déchets industriels [334].

La contamination anthropique de l'eau par le Cadmium est possible par les activités comme l'exploitation minière, la fonderie, le fumage, le rejet d'eaux usées industrielles et des particules en suspension dans l'air [335,336].

De plus, le niveau de contamination de l'eau par le Cadmium est augmenté par la corrosion des conduites d'alimentation, des réservoirs de stockage d'eau qui sont principalement recouverts de Cadmium et de Zinc, ou par l'utilisation d'ustensiles recouverts de peinture [300].

#### **D. Concentration du Nickel dans l'eau d'abreuvement**

Les valeurs obtenues pour le Nickel dans l'eau d'abreuvement sont contenues dans une échelle allant de 7,84 à 31,07 $\mu\text{g/l}$  avec une moyenne arithmétique de 16,57 $\pm$ 5,79 $\mu\text{g/l}$ . Tous nos résultats sont inférieurs à la recommandation algérienne et celle de l'OMS qui est de 70 $\mu\text{g/l}$  [328,329]. Cependant, selon la recommandation européenne de 20 $\mu\text{g/l}$ , 17,5% des échantillons d'eau (n=7) ont une concentration supérieure à cette limite [337].

Au contraire des autres métaux, aucune différence significative n'a pas été retrouvée entre les échantillons proches des stations d'essence et ceux éloignés suggérant, comme pour le sol, l'absence d'une pollution anthropique de ce métal.

#### **E. Concentration du Mercure dans l'eau d'abreuvement**

Les concentrations du Mercure dans l'eau ont varié de non détectable à 1,31 $\mu\text{g/l}$  avec une moyenne arithmétique de 0,53 $\pm$ 0,33 $\mu\text{g/l}$ . Selon la réglementation algérienne, aucun échantillon n'a dépassé la valeur limite de 6 $\mu\text{g/l}$  [329]. Cependant selon la réglementation européenne, 4 (10%) échantillons ont dépassé la limite réglementaire de 1 $\mu\text{g/l}$  [337].

Le Mercure est naturellement présent dans les réservoirs d'hydrocarbures et peut contaminer les infrastructures de traitement. L'extraction du pétrole peut entraîner la contamination de l'eau.

Le Mercure est présent à la fois dans le flux d'eau produit de l'unité de séparation primaire et dans le flux de rejet des eaux usées [338-340]. Les concentrations typiques de Mercure détectées dans les eaux de production de plusieurs gisements de gaz et de pétrole bien connus se situent entre 1 et 300 $\mu\text{g/l}$  [338-341].

Bien que la concentration de Mercure dans les eaux non polluées soit généralement très faible, il est important de se rappeler que le Mercure peut être bioconcentré dans la chaîne alimentaire [342]. Par conséquent, il est crucial de surveiller la consommation de nourriture et d'eau contenant du Mercure, en particulier dans les zones à risque élevé de contamination comme dans notre zone d'étude qui est une zone pétrolière par excellence.

### F. Corrélation entre les métaux dans l'eau d'abreuvement

Les teneurs en Cadmium, Plomb, Nickel et Mercure dans l'eau étaient dans la majorité des cas inférieures à la concentration maximale admise correspondante. Ainsi, l'apport de métaux provenant de l'eau a été considéré comme négligeable par rapport aux autres matrices environnementales (sol et plantes). Une faible corrélation ( $r < 0,200$ ) entre les quatre métaux a été observée suggérant une multiplicité des sources de contamination et une absence d'interaction entre ces métaux.

### III.3.3. Contamination métallique des plantes

Le transfert des métaux des plantes vers l'animal se produit lorsqu'un animal consomme des plantes contaminées. Les plantes et le fourrage sont des vecteurs importants de transport de métaux, car ils ont un impact sur la qualité des produits alimentaires provenant d'animaux nourris avec ces denrées [205].

Les métaux sont absorbés par les racines à partir du sol, puis transportés vers les parties supérieures de la plante telles que les feuilles, les tiges et les fruits. Lorsque les animaux mangent ces parties, les métaux sont ingérés et absorbés dans leurs organismes. Les métaux peuvent ensuite s'accumuler dans les tissus de l'animal, notamment dans les muscles, le foie et le rein et être transférés à d'autres animaux ou à l'homme si les produits alimentaires sont consommés par ces derniers [135, 158].

Ne connaissant pas précisément le régime alimentaire des dromadaires dans les élevages et les proportions de plantes ingérées, nous ne pouvons pas avoir une idée précise de la quantité de métaux lourds réellement ingérée par les chamelles. Néanmoins les valeurs observées montrent que la déposition en Plomb et en Cadmium a bien eu lieu sur les plantes échantillonnées.

### A. Concentration du Plomb dans les plantes

Il convient de noter que les teneurs observées ont varié en fonction de la partie prélevée de la plante, ce qui peut induire des biais d'observation. De plus, il a été difficile d'effectuer une identification botanique précise des plantes récoltées.

Nous avons observé que les concentrations de Plomb ont varié de 1,08 à 13,43mg/Kg avec une moyenne arithmétique de  $6,97 \pm 4,24$ mg/Kg. Treize de nos échantillons (32,5%) ont dépassé la limite de 10mg/Kg, spécifiée par l'OMS pour les plantes médicinales montrant ainsi des signes évidents de contamination environnementale [343].

Ces résultats étaient attendus, car les élevages étudiés sont modérément pollués par le Plomb comme ceci a été montré pour le sol (valeur Igeo modérée). Cette situation est probablement due à la densité des véhicules et la proximité des stations d'essence des différents sites de prélèvements.

La concentration moyenne de Plomb dans nos échantillons était plus élevée que celle relevée au Kazakhstan et qui a traité également de la relation entre la nourriture et la qualité du lait de chamelle ( $1,25 \pm 0,50 \text{ mg/Kg}$ ) [133], ainsi que celle observée par Caggiano et al., (2005) au niveau de 12 élevages d'ovins dans le sud de l'Italie ( $1,20 \text{ mg/Kg}$ ) [344].

Des concentrations allant de 0,76 à 6,63 mg/Kg ont été détectées dans le fourrage de fermes proches de routes en Thaïlande par Parkpian et al., (2003) [317]. Quant à Rashed., (1992), il a montré que la concentration de Plomb dans le fourrage aux alentours de fermes en Egypte était en moyenne comprise entre 7,70 et 16,0 mg/Kg, soit à des niveaux similaires à ceux que nous avons observés [345].

Notre hypothèse sur le rôle des stations d'essence dans la pollution métallique est par ailleurs confirmée par une différence significative entre les échantillons prélevés dans les zones proches des stations d'essence et celles plus éloignées ( $7,38 \pm 4,59 \text{ mg/Kg}$  vs  $6,36 \pm 3,72 \text{ mg/Kg}$  ;  $p < 0,05$ ). Néanmoins, il existe une grande variabilité dans nos résultats qui est difficile à expliquer en l'absence d'une méthode d'échantillonnage appropriée basée sur des prélèvements rigoureux (comprenant des échantillons de la même plante et prélevés dans la même zone).

Sigh et al., (1997) ont montré une variation des niveaux de Plomb dans le sol et la végétation le long de deux autoroutes près de Lucknow, en Inde, avec une concentration qui a diminué au fur et à mesure de l'éloignement des bords de la route [346, 347].

Comme pour les mammifères, le plomb n'est pas un élément essentiel pour la plante bien qu'il s'accumule dans différentes parties des plantes. Il affecte négativement divers processus physiologiques, comme la photosynthèse, la respiration, la nutrition minérale, la structure et les propriétés de la membrane et l'expression des gènes [352].

### **B. Concentration du Cadmium dans les plantes**

Les concentrations de Cadmium dans les plantes ont varié de 0,11 à 1,40 mg/Kg avec une moyenne arithmétique de  $0,60 \pm 0,37 \text{ mg/Kg}$ . Le taux moyen dans notre étude est relativement élevé par rapport à la teneur admissible dans le fourrage cité dans la littérature qui est de 0,5 mg/Kg [150].

Cela peut être associé à une utilisation extensive d'engrais et d'herbicides à base de Cadmium. Cependant, comme la région est désertique, cette hypothèse est peu probable. Les résultats obtenus doivent être analysés prudemment du fait de la variation des espèces végétales, des différences de localisations et des sources de pollution pour chaque site d'échantillonnage.

Cependant, même si les concentrations de Cadmium dans les plantes n'apparaissent pas très élevées, du fait de l'ingestion pendant une longue période par les animaux, il peut y avoir une influence sur la qualité des produits issus d'animaux [347,348].

Nos valeurs se trouvent dans les intervalles de concentrations retrouvées auparavant dans d'autres études. Ainsi, une concentration de 0,56mg/Kg a été reportée pour les plantes prélevées au niveau de 8 élevages de chèvres au sud du Kazakhstan [139]. Une concentration de 0,32mg/Kg au niveau de fermes bovines retrouvées dans un milieu non pollué en Chine par Cai et al., (2009) et une concentration allant de 0,15 à 0,68mg/Kg dans des fermes en Thaïlande par Parkpian et al., (2003).

Comme pour le Plomb, le Cadmium n'est pas connu pour avoir une fonction biologique et plusieurs études montrent qu'il est très toxique pour les plantes et les animaux. De plus, comparé aux autres métaux, le Cadmium est plus mobile dans le sol en termes de disponibilité pour les plantes [349-351]. Et enfin, certaines plantes sont accumulatrices du Cadmium et auront des concentrations plus élevées comme le montre une étude qui a reporté des valeurs moyennes de 3,42, 2,24 et 6,15mg/Kg pour le raisin, l'artichaut et le poivron respectivement [352].

### **C. Facteurs de variabilité de la concentration des métaux dans les plantes**

La littérature montre que la chaîne alimentaire est une source importante d'accumulation de Cadmium et de Plomb, en particulier pour les plantes cultivées sur des sols pollués [353,354]. Des quantités importantes de Cadmium et de Plomb peuvent être transférées du sol contaminé aux plantes et à l'herbe [355,356], provoquant l'accumulation de ces métaux potentiellement toxiques chez les ruminants au pâturage [357], en particulier chez les bovins [358].

Nos résultats montrent une différence non significative (Friedman test  $p > 0,05$ ) entre les concentrations du Plomb et du Cadmium au cours des quatre saisons de l'année avec une concentration moyenne plus élevée durant le printemps. Selon plusieurs auteurs, les fluctuations saisonnières devraient toujours être reconnues comme un facteur important dans la variation des concentrations des métaux dans les plantes [359, 360].



Dans une étude portant sur des plantes d'un écosystème forestier en Norvège, le Cadmium a été classé comme un élément peu variable au cours des saisons restant relativement stable au fil du temps [361]. Cependant, dans les pâturages d'une zone minière en Angleterre, une faible concentration a été observée au printemps, augmentant à nouveau à l'automne pour atteindre un niveau élevé pendant l'hiver [362].

De leur côté, Kim et Fergusson., (1994) ont suggéré que le printemps est probablement la période reflétant le mieux la quantité de métaux transportés vers les parties supérieures des plantes à partir des tiges ou des racines, puisque la charge en métal au cours de cette période est susceptible d'être la moins affectée par les différences de contamination de surface [363].

A côté de la variation saisonnière, plusieurs facteurs peuvent participer à l'accumulation des métaux dans les plantes :

- Le rôle du trafic routier : dans l'élevage 7 (GPS : 33°17'07.3"N 6°01'45.1"E), les plantes ont contenu les concentrations les plus élevées en Plomb et Cadmium comme pour la matrice du sol. Comme cité plus haut, cet élevage possède l'indice de pollution le plus élevée, se situe entre plusieurs stations d'essence et se trouve près d'une route à densité moyenne.
- La teneur en Plomb dans les plantes est corrélée avec la moyenne journalière du trafic de voitures sur les routes [364-366]. À titre d'exemple, les concentrations moyennes en Plomb dans les plantes près des routes à Peshawar City, Pakistan, étaient de 49,1 et 10,9mg/Kg pour les routes principales et secondaires, respectivement avec une variation significative ( $p < 0,05$ ) attribuée à la différence de densité du trafic [364]. Cependant, cette corrélation n'est pas toujours observée [367].
- Le rôle des industries polluantes : globalement, la littérature rapporte des teneurs plus élevées dans les pâturages situés à proximité des zones industrielles. Ainsi, dans le fourrage de la région industrielle de Delhi (Inde), Dey et al., (1996) ont observé une concentration de 46mg/Kg pour le Plomb et de 1,1mg/Kg pour le Cadmium.

Dans une autre région métallifère de Bulgarie, la concentration du Plomb était de 3500mg/Kg et celle du Cadmium de 280mg/Kg dans les plantes qui se situent dans cette zone [151]. En Chine près d'usines, la teneur en Plomb dans les feuilles pâturées par les animaux a varié de 3,6mg/Kg dans les zones non polluées à 132mg/Kg dans les zones très polluées, soit une valeur 40 fois plus élevée que la norme admise pour les plantes dans ce pays qui est de 8mg/Kg [150].

Finalement, Raj et al., (2019) ont rapporté que dans les plantes poussant sur un sol contaminé et irrigué avec des eaux polluées, des taux élevés ont été relevés (0,79mg/Kg pour le Cadmium et 19,22mg/Kg pour le Plomb) [368].

- Autres facteurs de variabilité : la disponibilité des métaux est influencée par la qualité du sol avec des facteurs comme le pH, le contenu de la matière organique, la conductivité électrique, etc. [369].

L'absorption des métaux lourds et l'accumulation de ces derniers dépendent de l'espèce végétale et même de la morphologie de la même espèce. De plus certaines parties seront plus concentrées en métaux que d'autres [369]. Avec une concentration moyenne en Cadmium de 1,26mg/Kg dans le sol, le carambole (*Averrhoa carambola*) accumule ce métal surtout dans les racines (7,57mg/Kg), les branches (10,84mg/Kg) et les feuilles (9,01mg/Kg) tandis que la concentration est plus faible dans les fruits (2,15mg/Kg) [367]. Les plantes feuilletées sont également réputées pour accumuler plus de métaux que les plantes non feuilletées. Par exemple, les plantes de la famille des Astéracées sont réputées comme hyper accumulatrices du Plomb [370,371]. Ces plantes peuvent contenir 1377mg/Kg dans les pousses, 4236mg/Kg dans les racines, et peuvent résister et survivre à des concentrations allant à 100000mg/Kg dans le sol [371].

#### D. Corrélation entre les métaux dans les plantes

La corrélation entre les concentrations de Plomb et de Cadmium dans les plantes s'est avérée très faible, bien qu'elle ait été positive ( $r = 0,051$ ). Malheureusement, il est difficile d'avoir une conclusion plausible à notre résultat. De plus, plusieurs espèces végétales ont été collectées, ce qui rend notre analyse très limitée.

L'absorption de métaux par les plantes dépend de nombreux paramètres et certaines plantes sont de grandes accumulatrices de métaux alors que d'autres ne peuvent fixer certaines molécules. Cependant, Baye et al., (2010) ont observé des corrélations positives et significatives au sein d'espèces végétales distinctes, comme *Hagenia abyssinica* et *Thymus serrulatus* avec un  $r > 0,90$ . Les auteurs de ce travail ont montré que l'assimilation des minéraux par les plantes peut être dépendante de mécanismes et de facteurs similaires [372].

Ne connaissant pas précisément le régime alimentaire des dromadaires et les proportions de plantes ingérées, nous ne pouvons pas avoir une idée précise de la quantité de métaux lourds ingérée par les chamelles à partir de cette matrice. De plus, il est essentiel de noter que les compléments alimentaires administrés par les éleveurs n'ont pas été soumis à une analyse.

Par conséquent, nous ne pouvons pas écarter la possibilité d'une autre source potentielle de contamination. Néanmoins les valeurs observées montrent que la déposition et le transfert du sol vers les plantes a bien eu lieu sur les plantes étudiées. Il existe donc un risque d'ingestion par les chamelles mais qui ne semble pas trop élevé vis-à-vis de l'échelle de valeurs obtenues.

### III.3.4. Contamination métallique du lait de chamelle

Récemment, il y a eu une tendance à la hausse de la consommation de lait de chamelle en raison des avantages perçus pour la santé par rapport au lait traité thermiquement, notamment une valeur nutritionnelle accrue et la présence potentielle de bactéries probiotiques [28].

Cependant, les données concernant la présence d'éléments essentiels et toxiques dans le lait disponibles sur le marché sont encore rares. La partie suivante vise ainsi à évaluer et analyser les teneurs en métaux lourds (Pb, Cd, Ni, Hg) dans le lait de chamelle d'élevages du Sud-est de l'Algérie et les risques sanitaires associés.

#### A. Concentration du Plomb dans le lait de chamelle

L'exposition au Plomb issu de l'alimentation perturbe les systèmes nerveux et circulatoire et affecte plusieurs organes du corps provoquant dysfonctionnement rénal, anémie, réduction du quotient intellectuel, troubles du comportement, maladies neurodégénératives, etc. [125].

La concentration du Plomb dans nos échantillons de lait de chamelle (n=120) a varié de 8,28 à 57,27 $\mu\text{g/Kg}$  avec une moyenne arithmétique de 26,32 $\pm$ 12,85 $\mu\text{g/Kg}$ . Les valeurs obtenues ont été confrontées à celles d'études antérieures, comme indiqué dans le Tableau 93.

Au niveau national, nos résultats étaient supérieurs aux concentrations retrouvées dans une étude préliminaire dans la région de Touggourt (12,11 $\pm$ 4,89 $\mu\text{g/Kg}$ ), cependant le nombre d'échantillons était plus limité (n=8) et la localisation des élevages était différente [201].

Les niveaux de Plomb présentent une variation significative d'une région à l'autre. Nos résultats ont montré des similitudes avec les résultats obtenus au Kazakhstan (25 $\pm$ 2 $\mu\text{g/Kg}$ ), mais ont dépassé ceux signalés en Iran (8,28 $\pm$ 2,93 $\mu\text{g/Kg}$ ) et en Chine (1,2 $\pm$ 7,1 $\mu\text{g/Kg}$ ) [139,188,199,361].

Toutefois, nos valeurs étaient largement inférieures à l'étude de Elamin et Wilcox., (1992) où une concentration de 180000 $\mu\text{g/Kg}$  dans le lait de chamelle a été reportée en Arabie Saoudite, ce qui semble considérable [373].

**Tableau 93. Comparaison des concentrations du Plomb dans le lait de chamelle de notre étude ( $\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) et de la littérature.**

Région	Concentration ( $\mu\text{g}/\text{Kg}$ )	Dépassement de la norme de l'OMS ( $20\mu\text{g}/\text{Kg}$ )	Nombre d'échantillons analysés	Année	Référence
Arabie saoudite, lait de chamelle	180000 $\pm$ 70000	Oui	81	1992	[373]
Egypte, lait de chamelle	1354 $\pm$ 1639	Oui	25	2008	[188]
Kazakhstan, lait de chamelle	25 $\pm$ 2	Oui	24	2011	[139]
Espagne, lait de vache	3,83 $\pm$ 4,04	Non	36	2012	[376]
Iran, lait de vache	12,9 $\pm$ 6,00	Non	1440	2013	[378]
Iran, lait de chamelle	8,28 $\pm$ 2,93	Non	25	2016	[196]
Croatie, lait de vache	11,4 $\pm$ 8,08	Non	249	2016	[375]
Iran, lait de chamelle	3,14 $\pm$ 0,26	Non	150	2019	[198]
Canada, lait de vache	3 $\pm$ 2	Non	156	2019	[377]
Chine, lait de chamelle	1,2 $\pm$ 7,1	Non	50	2020	[199]
Touggourt (Algérie), lait de chamelle	12,11 $\pm$ 4,89	Non	8	2021	[201]
Guelma, lait de vache	940 $\pm$ 490	Oui	88	2023	[137]
Notre étude	26,32 $\pm$ 12,85	Oui	120	2022	/

La concentration moyenne de Plomb de nos échantillons a dépassé les limites du *Codex Alimentarius* et de la réglementation européenne ( $20\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) [176,177]. De plus, 99,16% des échantillons ( $n=119$ ) avaient des concentrations supérieures à la limite pour les nourrissons ( $10\mu\text{g}/\text{Kg}$ ), suggérant un risque potentiel pour la santé des jeunes consommateurs.

La teneur du Plomb dans le lait de chamelle a été moins explorée par rapport au lait de vache, qui a fait l'objet de nombreuses revues systématiques et d'articles [4,138,174,175,197,199,374]. La littérature rapporte que l'analyse d'échantillons provenant de pays en développement tels que le Pakistan, l'Éthiopie, le Nigeria, le Mexique, l'Argentine, le Bangladesh, l'Égypte et le Soudan a également révélé des concentrations de Plomb qui dépassant les limites réglementaires recommandées. En contraste, les pays développés tels que l'Espagne, la Corée du Sud, et le Canada ont montré des niveaux de Plomb moins élevés [375-377].

La concentration en Plomb dans le lait varie selon les espèces animales [199,378]. Chen et al., (2020) ont montré que les concentrations de Plomb dans le lait de brebis étaient plus faibles que dans le lait de chèvres et de vaches. Néanmoins, les résultats sont extrêmement variables avec des teneurs maximales pouvant aller de  $32\mu\text{g}/\text{Kg}$  à  $60000\mu\text{g}/\text{Kg}$  selon la région [199]. En Algérie, Boudebbouz et al., (2023) ont rapporté une concentration moyenne de  $940\pm 490\mu\text{g}/\text{Kg}$  dans la région de Guelma, dépassant la recommandation du *Codex Alimentarius* [137].

La concentration maximale ( $42,78\pm 8,13\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) a été retrouvée dans le lait échantillonné de l'élevage 7 (GPS :  $32^{\circ}55'56.8''\text{N}$   $5^{\circ}55'37.3''\text{E}$ ). Ce résultat s'explique par sa position géographique qui se trouve à proximité d'une route fréquentée et de plusieurs stations d'essence. En conséquence, il est envisageable que les animaux se trouvant dans cet élevage consomment des plantes et du sol contaminés par le Plomb (rapporté plus haut), lequel peut par la suite se retrouver dans le lait. Sur la base de l'écart-type observé dans notre étude, nous pouvons suggérer une grande hétérogénéité de la contamination du lait. Ceci était attendu, car la contamination du lait par les métaux est principalement due à la contamination de l'environnement et également à la contamination du fourrage donné aux animaux [379].

De plus, nos résultats mettent en évidence une différence significative ( $p<0,05$ ) entre le lait provenant des sites à proximité des stations d'essence par rapport à ceux plus éloignés ( $32,14\pm 13,93\mu\text{g}/\text{Kg}$  contre  $22,43\pm 10,52\mu\text{g}/\text{Kg}$ , respectivement).

Plusieurs auteurs concordent sur l'idée que le lait provenant d'animaux élevés à proximité d'usines et de routes présente des niveaux significativement plus élevés de Plomb que le lait produit en zones rurales ou non polluées [144,380].

À titre d'exemple en Chine, Zhou et al., (2017) ont montré que les concentrations de Plomb mesurées dans le lait provenant de zones industrielles polluées étaient significativement plus élevées que celles trouvées dans des zones non polluées ( $1430\mu\text{g/Kg}$  vs  $160\mu\text{g/Kg}$ , respectivement) [381].

Au Pakistan, la concentration de Plomb retrouvée dans le lait cru produit dans une zone industrielle ( $30\pm 4\mu\text{g/Kg}$ ) était supérieure à la valeur retrouvée dans les marchés de la même ville ( $10\pm 2\mu\text{g/Kg}$ ) [222].

En Turquie, Bigucu et al. (2016) ont montré que la concentration de Plomb la plus élevée a été retrouvée dans le lait de la région proche des autoroutes ( $1850\pm 90\mu\text{g/Kg}$ ), suivie par celle proche des usines ( $1030\pm 50\mu\text{g/Kg}$ ) et enfin celle qui était proche d'usines de production alimentaire ( $1010\pm 50\mu\text{g/Kg}$ ) [382]. Au sud du Nigeria, la concentration de Plomb ( $340\pm 140\mu\text{g/Kg}$ ) obtenue dans une déchèterie était supérieure à celle de zones non polluées, où la teneur était non détectable [383].

Derakhshesh et Rahimi., (2012) ont également signalé que Plomb dans le lait de vache collecté dans une zone industrielle ( $20\pm 9\mu\text{g/Kg}$ ) était supérieur à celui retrouvé dans une zone non polluée ( $5\pm 2\mu\text{g/Kg}$ ) [384].

D'après la littérature, les concentrations du Plomb dans le lait sont fortement influencées par les variations saisonnières et sont attribuées au changement de la composition botanique de l'herbage [385]. En explorant l'influence des variations saisonnières pour notre étude, nous avons constaté que les concentrations étaient plus élevées au printemps ( $26,65\pm 8,44\mu\text{g/Kg}$ ). Cependant, bien qu'il y ait une tendance à des concentrations plus élevées, l'analyse de variance n'a pas mis en évidence de différences significatives avec les autres saisons ( $p > 0,05$ ).

Dans une étude au Pakistan, les auteurs ont rapporté des résultats similaires avec un niveau élevé de Plomb ( $23240\pm 300\mu\text{g/Kg}$ ) pendant la saison estivale en comparaison avec la saison hivernale [386]. Les valeurs enregistrées pendant la saison estivale peuvent être attribuées à la concentration accrue des métaux résultant de l'évaporation de l'eau contenue dans les plantes. Cette évaporation laisse derrière elle des concentrations relativement plus élevées, susceptibles d'être ingérées par les animaux. Cependant, Konuspayeva et al., (2011) ont rapporté des concentrations moins élevées pendant le printemps [139].

### B. Concentration du Cadmium dans le lait de chamelle

Les concentrations de Cadmium dans le lait de chamelle ont varié de 0,15 à 1,15 $\mu\text{g}/\text{Kg}$  avec une moyenne arithmétique de 0,95 $\pm$ 0,17 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ . Les concentrations reportées ont été comparées avec celles de la littérature dans le Tableau 94.

**Tableau 94. Comparaison des concentrations du Cadmium de notre étude ( $\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) avec ceux de la littérature.**

Région	Concentration du Cd ( $\mu\text{g}/\text{Kg}$ )	Supérieur à la norme (2,6 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ )	Nombre d'échantillons analysés	Année	Référence
Kazakhstan	2 $\pm$ 1	Oui	24	2011	[139]
Nigeria	0,105	Non	Non mentionné	2014	[387]
Arabie saoudite	[7-89]	Oui	6	2015	[388]
Iran	0,30 $\pm$ 0,05	Non	25	2016	[196]
Libye	0,04 $\pm$ 0,01	Non	10	2016	[193]
Turquie	190 $\pm$ 10 et 390 $\pm$ 20	Oui	27	2016	[389]
Pakistan	102 $\pm$ 7	Oui	8	2017	[197]
Iran	1,22 $\pm$ 0,11	Non	150	2019	[198]
Chine	0,78 $\pm$ 1,91	Non	50	2020	[199]
Touggourt, Algérie	2,89 $\pm$ 1,80	Oui	10	2021	[202]
Algérie	30 $\pm$ 10	Oui	88	2023	[137]
Notre étude	0,95 $\pm$ 0,17	Non	120	2022	/

Localement, nos résultats étaient inférieurs à ceux rapportés par Bougrinat et al., (2021) dans la région de Touggourt (2,89 $\pm$ 1,80 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ ), cependant le nombre d'échantillons n'était pas similaire [202].

Au niveau international, les concentrations évoquées dans notre étude se sont avérées similaires à celles du lait de chamelle en Chine (0,86 $\pm$ 1,191 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) [199] et au Kazakhstan (2 $\pm$ 1 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) [139], tout en étant nettement inférieures à celles du Pakistan (102 $\pm$ 7 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) [197] et dans l'ouest de l'Arabie Saoudite, où les niveaux mesurés se situaient entre 7 et 89 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ , soit plus de dix fois supérieurs à nos résultats [387]. Enfin, nos résultats surpassent les données présentées par Mostafidi et al., (2016) (0,30 $\pm$ 0,05 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) en Iran [196].

Le niveau de Cadmium le plus jamais reporté ( $12000\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) dans le lait a été retrouvé dans des échantillons de lait prélevés sur des animaux élevés à proximité d'une source de pollution dans la région de Tirupati de lait d'Inde [390]. En Algérie, Boudebbouz et al., (2023) ont rapporté une concentration de  $30\pm 10\mu\text{g}/\text{Kg}$  dans la région de Guelma [137].

Tout comme pour le Plomb, les échantillons provenant de pays en développement (Pakistan, Nigeria et Égypte) ont montré une contamination par le Cadmium au-delà de la limite maximale autorisée, suggérant un risque accru pour les consommateurs. En revanche, des pays plus développés tels que l'Espagne et la Corée du Sud ont montré une contamination minimale, indiquant la bonne application des réglementations dans ces pays, comme mentionné dans trois revues systématiques publiées récemment [169,174,175].

Une différence significative ( $p=0,001$ ) a été observée entre les échantillons des élevages proches de stations d'essence ( $0,98\pm 0,14\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) avec celles des plus éloignées ( $0,91\pm 0,21\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) suggérant un impact des activités anthropiques sur la qualité du lait de chamelle dans la région d'étude.

Patra et al., (2008) ont obtenu des résultats similaires pour le Cadmium dans les zones industrielles (centrale thermique et fonderie Plomb-Zinc) avec des teneurs significativement plus élevées ( $p<0,05$ ) dans le lait produit par des vaches élevées dans les zones industrielles [207].

En Turquie, Bigucu et al., (2016) ont obtenu des niveaux de Cadmium variant entre  $390\pm 20\mu\text{g}/\text{Kg}$  pour les vaches élevées à proximité des autoroutes et  $190\pm 10\mu\text{g}/\text{Kg}$  pour les vaches proches des usines de production alimentaire [389]. Elatrash et Atoweir., (2014) ont aussi décrit l'influence de l'intensité du trafic avec le niveau de Cadmium dans les échantillons de lait collectés en milieu rural de Benghazi, en Libye [390].

Finalement, Qu et al., (2019) ont mesuré le Cadmium dans 192 échantillons de lait cru provenant de plusieurs districts de la ville de Tangshan (Pakistan), pour trouver des niveaux relativement plus élevés dans le district industriel que dans le district non industriel [391].

En ce qui concerne l'influence des saisons sur la concentration de Cadmium, une variation non significative a été constatée ( $p>0,05$ ). Toutefois, à l'instar du Plomb, les concentrations maximales ont été observées pendant la saison estivale ( $0,98\pm 0,07\mu\text{g}/\text{Kg}$ ).

Cette augmentation pendant la période estivale pourrait être attribuée à la forte consommation d'eau par les animaux, d'autant plus que les concentrations maximales de Cadmium dans l'eau ont été enregistrées durant la même saison.



### C. Concentration du Nickel dans le lait de chamelle

Les concentrations de Nickel dans le lait de chamelle ont varié de 9,23 à 20,71  $\mu\text{g}/\text{Kg}$  avec une moyenne arithmétique de  $16,85 \pm 2,06 \mu\text{g}/\text{Kg}$ . Le Tableau 95 présente les différentes études qui ont été réalisées et qui concernent le Nickel dans le lait de chamelle.

**Tableau 95. Comparaison des concentrations du Nickel retrouvées ( $\mu\text{g}/\text{Kg}$ ) avec celles de la littérature.**

Localisation	Concentration ( $\mu\text{g}/\text{Kg}$ )	Nombre d'échantillons Analysés	Année	Référence
Chine	131 $\pm$ 148	50	2019	[199]
Pakistan	220 $\pm$ 1	8	2017	[197]
Arabie Saoudite	2100	5	2016	[195]
	1510	5		
Egypte	16109 $\pm$ 3358	25	2008	[186]
Iran	0,53 $\pm$ 0,02	25	2016	[196]
Inde	833000	1	2020	[394]
Pakistan	23500 $\pm$ 300	15	2011	[386]
Arabie Saoudite	1200	5	2022	[203]
	950	5		
	900	5		
Algérie	16,85 $\pm$ 2,06	120	2022	Notre étude

Aucune étude nationale n'a été retrouvée sur le Nickel. Au niveau mondial, Ahmed et al., (2017) ont retrouvé une concentration plus importante ( $220 \pm 1 \mu\text{g}/\text{Kg}$ ) [196], tandis que Mostafidi et al., (2012) ont rapporté des concentrations beaucoup plus faibles ( $0,53 \pm 0,02 \mu\text{g}/\text{Kg}$ ) par rapport à la nôtre [196]. La concentration la plus jamais reporté a été réalisé en Egypte avec une concentration de  $16109 \pm 3358 \mu\text{g}/\text{Kg}$  [186].

Le niveau d'apport quotidien recommandé en Nickel par l'alimentation est de 0,3 à 1 mg/Kg [392]. Comme pour le Plomb et le Cadmium, une revue systématique de la littérature a mis en évidence que les pays les plus développés comme la France, l'Espagne et la Corée du Sud ont montré moins de contamination de Nickel dans les échantillons de lait [393].

Les teneurs maximales jamais observées dans des échantillons de lait de vaches élevées ont été enregistrées dans la région de Tirupati en Inde avec une valeur de  $833000\mu\text{g/Kg}$  [394], suivie de celle de la région du Pakistan ( $23500\pm 300\mu\text{g/Kg}$ ) [386].

Une différence significative concernant les concentrations du Nickel ( $p < 0,001$ ) a été observée en comparant les échantillons près des stations d'essence et ceux plus éloignés ( $17,28\pm 1,85$  vs  $16,56\pm 2,16\mu\text{g/Kg}$ ). De même, des résultats similaires ont été observés dans le Pakistan (zone polluée  $800\mu\text{g/Kg}$  contre zone non polluée  $20\mu\text{g/Kg}$ ) [395] et en Inde (zones non polluées  $200\mu\text{g/Kg}$  vs zones d'extraction de Cuivre  $620\mu\text{g/Kg}$ ) [396].

#### **D. Concentration du Mercure dans le lait de chamelle**

Dans notre étude, les concentrations du Mercure dans le lait de chamelle ont varié de  $0,17$  à  $1,02\mu\text{g/Kg}$  avec une moyenne arithmétique de  $0,50\pm 0,18\mu\text{g/Kg}$ . Selon nos connaissances, le nombre de données sur la concentration de Mercure dans le lait de chamelle est limité par rapport aux autres métaux.

Les données actuelles indiquent que les niveaux de Mercure dans les échantillons de lait à travers le monde sont généralement dans les limites de sécurité [137]. En analysant 150 échantillons de lait de chamelle, Parsaei et al., (2019) ont rapporté une concentration moyenne de  $2,36\pm 0,21\mu\text{g/Kg}$ , supérieure à celle que nous avons retrouvée [198].

Au Pakistan, une concentration de  $0,55\pm 0,01\mu\text{g/Kg}$  a été signalée dans des échantillons de lait provenant de vaches buvant des eaux usées [386]. Au Bangladesh, Kabir et al., (2017) ont trouvé une concentration plus importante ( $400\mu\text{g/Kg}$ ) dans du lait prélevé de vaches se trouvant à proximité duquel sont rejetés les déchets industriels [396]. Finalement en Espagne, González-Montaña et al., (2019) ont analysé des échantillons de lait prélevés sur des vaches élevées à proximité de l'industrie sidérurgique et ont retrouvé des valeurs de Mercure inférieures à la limite de détection établie [19].

Les résultats de notre étude ont indiqué une variation significative ( $p < 0,05$ ) de la concentration du Mercure dans le lait lorsque comparé en zones proches des stations d'essence ( $0,52\pm 0,16\mu\text{g/Kg}$ ) avec les élevages plus éloignées ( $0,48\pm 0,20\mu\text{g/Kg}$ ). Les concentrations plus élevées de Mercure pour les élevages proches des stations d'essence peuvent être dues au fait du plus grand nombre de sources de pollution par rapport à la seconde zone. Cependant, comme pour les autres métaux aucune variation saisonnière n'a été observée pour le lait de chamelle.

### E. Corrélation entre les métaux dans le lait de chamelle

Une faible corrélation positive ( $r = 0,192$ ) entre les concentrations en Cadmium et en Plomb a été observée pour nos échantillons de lait. Cette corrélation a également été constatée pour les échantillons de sol ( $r = 0,604$ ).

Plusieurs auteurs s'accordent que le Plomb et le Cadmium coexistent souvent dans les régions polluées [397]. Dans l'étude menée par Pilarczyk et al. (2013), une corrélation positive et significative entre le Plomb et le Cadmium dans le lait de vaches a été mise en évidence ( $r = 0,86$ ) [398], tandis que l'étude de Pavlovic et al. (2004) n'a pas révélé de corrélation entre ces deux métaux [399]. Le Plomb et le Cadmium peuvent être transportés dans l'environnement depuis les points industriels vers les sols grâce aux vents puissants dans cette région (pouvant aller à 100Km/h) et finissent par atteindre les sols où se trouvent les animaux qui finiront ensuite par les ingérer [394].

Une absence de corrélation est suggérée pour le Nickel en regardant les valeurs du coefficient de corrélation observée ( $r=0,009$ ), suggérant que la source de ce métal est différente. Cependant, une étude plus poussée est nécessaire pour confirmer cette hypothèse.

## III.4. Analyse de la contamination métallique et de ses implications

### III.4.1. Facteur de transfert du Plomb et du Cadmium (sol-plantes et plantes-lait)

Les FT du sol aux plantes pour le Plomb et le Cadmium ont été reportés dans le Tableau 88 avec des rapports de  $0,180 \pm 0,112$  pour le Plomb et  $0,862 \pm 0,884$  pour le Cadmium, respectivement.

Thorton et al., (1997) ont considéré qu'un facteur de transfert supérieur à 0,2 pourrait indiquer une contamination anthropique des plantes [400]. Les plantes avec des facteurs de transfert supérieurs à 1 sont classées comme hyper-accumulatrices, tandis que celles inférieures à 1 sont classées comme non-accumulatrices [401, 402].

Les valeurs moyennes de  $FT_{sp}$  pour le Cadmium étaient significativement supérieures à celles du Plomb, ce qui montre que le Cadmium est beaucoup plus facilement transféré du sol aux plantes. Une fois absorbé, il se combine avec des enzymes au lieu de Zinc, ce qui facilite son transfert. Plus la concentration du Cadmium dans le sol augmente, plus le Cadmium dans les légumes se retrouve en quantité élevée [403-405].

Les valeurs relativement plus faibles pour le Plomb indiquent qu'il est beaucoup plus difficile pour lui de passer du sol aux plantes [273], ce qui est en accord avec une précédente étude [403].

Kloke et al., (1984) ont rapporté des  $FT_{sp}$  de 0,01-0.1 pour le Plomb et de 1-10 pour le Cadmium. Nos résultats étaient similaires, indiquant des valeurs élevées pour le Cadmium par rapport au Plomb en raison de la mobilité et de la phyto-disponibilité élevée [406].

Le FT des plantes au lait était inférieur à 1, ce qui semble indiquer que les concentrations de métaux dans les plantes étaient plus élevées que dans le lait et qu'il y a une absence d'accumulation de métaux par ingestion de végétation, comme ceci a été montré par Yan et al., (2012) [407]. Malgré la préoccupation relative à la présence de métaux lourds dans le lait, les métaux ne semblent pas s'accumuler de manière significative. Les processus de filtration et de régulation biologique des dromadaires semblent jouer un rôle important dans la limitation de l'accumulation excessive de ces métaux dans le lait.

Cependant, une incertitude majeure doit être soulignée : le régime alimentaire des dromadaires n'a pas été établi de manière concluante au cours de cette étude, et il demeure incertain si les plantes analysées font effectivement partie de leur alimentation habituelle. Par ailleurs, afin d'approfondir l'évaluation du processus d'accumulation et de mobilisation des métaux, une analyse au niveau des milieux biologiques tels que le sang et les urines aurait pu apporter une contribution significative. Dans cette perspective, il serait judicieux de s'abstenir de tirer des conclusions catégoriques. Ainsi, il devient impératif de conduire des recherches complémentaires spécifiques visant à déterminer de manière précise le régime alimentaire des dromadaires dans la région étudiée.

#### **III.4.2. Corrélations entre les concentrations dans le lait et les matrices environnementales**

Selon la littérature, la principale source de métaux lourds dans le lait est la contamination environnementale [216], qui a pour origine les activités anthropiques comme la combustion de carburant, la proximité des routes, des zones minières et industrielles, les eaux usées et les déchets solides [216,217]. Les plantes et les fourrages cultivés sur des sols irrigués avec de l'eau contaminée permettent aux métaux lourds de passer dans le sol et l'eau puis de s'accumuler dans l'alimentation animale [218-220].

Pour étudier le transfert des métaux dans le lait de chamelle et comprendre l'origine de la pollution métallique dans nos échantillons, les tests de corrélation de Spearman et Kendall et les ACP ont été estimés entre les différentes matrices (lait, sol, eau et plantes).

Les résultats rapportés dans notre étude suggèrent un lien entre la teneur en métaux du lait et l'environnement de production.

Les résultats montrent une corrélation positive et significative entre la concentration du Plomb dans le lait et celle du sol ( $r = 0,207$ ) et des plantes ( $r = 0,289$ ). Ce qui suggère que les plantes et le sol représentent les principales sources de contamination. Le dromadaire peut ingérer de grandes quantités de sols et de plantes lors de son broutage [202]. Le transfert du Plomb par le biais des plantes semble similaire sur le lait de vache et de chamelle [316].

L'eau est cependant une source mineure de contamination du fait de la corrélation négative observée ( $r = -0,106$ ). En effet, le dromadaire est un animal résistant aux conditions désertiques et peut passer plusieurs jours sans boire d'eau [408].

De même que pour le Plomb, une corrélation positive entre la concentration du Cadmium dans le lait et celle du sol ( $r = 0,129$ ) et des plantes ( $r = 0,217$ ) et une corrélation négative entre le lait et l'eau ( $r = -0,141$ ) ont été observées. Selon Makridis et al., (2012), les concentrations de Cadmium dans l'alimentation animale et la durée d'exposition sont des facteurs importants pour prédire la teneur du métal dans le lait [409].

Finalement, une corrélation positive entre les concentrations de Mercure dans le lait et l'eau a été rapportée dans notre étude ( $r = 0,250$ ). Tunegova et al., (2016) ont signalé que le lait des animaux pouvait être contaminé par le Mercure, le Cadmium et le Plomb en raison de l'alimentation avec du fourrage et de l'eau contaminés, ainsi que du pâturage dans des zones contaminées [410].

Il nous paraît évident que le sol des élevages est la principale source des métaux qui peuvent être transférés aux plantes, deviennent de la nourriture pour les animaux, puis traversent le système digestif et sont accumulés dans les tissus et partiellement excrétés dans le lait, exposant ainsi le consommateur qui le boit. La littérature rapporte qu'une variation des concentrations de Plomb et de Cadmium dans le sol a un effet direct sur les concentrations de Plomb et de Cadmium dans la chaîne sol-fourrage-lait [376,411].

Tous ces résultats indiquent que les conditions de l'environnement local, telles que celles du sol, de l'eau, de l'industrie peuvent contribuer à la contamination par le Plomb, et le Cadmium chez les animaux et son transfert au lait, ce qui souligne l'importance du contrôle des éléments dans l'alimentation et l'eau d'abreuvement des animaux laitiers.

Dans l'ensemble, différents types de contamination par les métaux lourds dans le lait cru peuvent emprunter des voies complexes à partir de l'environnement, directement ou indirectement, via l'eau potable et le sol.

Plusieurs études ont évalué les origines possibles et les voies d'exposition des métaux dans le lait cru, en particulier l'effet de l'exposition à la pollution industrielle. Cependant, les échantillons de lait recueillis dans ces études provenaient presque toujours de mélange à lait comme pour la nôtre [174]. D'autres études longitudinales sont donc nécessaires pour clarifier la manière dont ces éléments sont transportés le long de la chaîne alimentaire.

De plus, une valeur de corrélation ne conduit pas automatiquement à une causalité. Pour confirmer l'hypothèse sur la composition des aliments, des informations supplémentaires sur le micro-environnement autour de l'élevage doivent être nécessaires.

### III.4.3. Évaluation probabiliste des risques pour la santé

La tendance des métaux à s'accumuler dans les tissus, leurs persistances et le risque élevé pour la santé ont soulevé des inquiétudes quant à l'impact sur la santé humaine de l'exposition alimentaire à des concentrations faibles mais chroniques à ces métaux. L'évaluation des risques pour la santé des consommateurs dans la zone étudiée est basée sur des apports quotidiens estimés, des coefficients de danger et l'indice de risque cancérigène.

#### A. Estimation de la consommation quotidienne des métaux ingérés

Le degré de toxicité des métaux pour les êtres humains dépend de leur taux d'ingestion quotidien. Dans ce cadre, les autorités internationales de la santé ont établi des doses maximales tolérables permises à la fois pour les métaux toxiques et les éléments essentiels (pour ceux qui produisent des effets indésirables). Les facteurs susceptibles de contribuer à l'exposition aux métaux sont la quantité de lait consommé et le poids corporel moyen.

Les résultats de l'EDI des métaux en question sont résumés dans le Tableau 89. Les valeurs quotidiennes des métaux ingérés variaient comme suit : Plomb > Nickel > Cadmium > Mercure, avec une exposition alimentaire maximale de  $3,45 \cdot 10^{-4}$  mg de Plomb /personne/jour pour les enfants et un minimum de  $2,16 \cdot 10^{-6}$  mg de Mercure /personne/jour pour les adultes.

Les valeurs pour les enfants étaient supérieures à celles des adultes avec une valeur du  $p$  inférieure à 0,05. Les valeurs moyennes de l'EDI du Nickel, Cadmium, Plomb et Mercure pour les enfants et les adultes et dans les deux scénarios sont inférieures aux valeurs limites légales relatives.

Nous pouvons donc suggérer que le lait de chamelle ne pose pas de risque pour la santé des consommateurs. Cependant, certains échantillons de lait ont dépassé la valeur EDI pour les enfants, notamment ceux de la région de Touggourt.

La toxicité des métaux dépend d'un certain nombre de facteurs dont les plus critiques sont la voie d'entrée dans le corps, l'âge et le sexe de la personne exposée, le niveau d'absorption, l'état du métal et le taux d'absorption [198]. Les nourrissons, les enfants et les personnes âgées, sont décrits comme particulièrement vulnérables aux risques d'exposition aux métaux lourds. Par conséquent, la présence de toute matière toxique dans le lait est un sujet de grave préoccupation [198].

Christophoridis et al., (2019) ont également rapporté une faible consommation de métaux lourds (Cd, Pb et Hg) dans les produits fromagers en Grèce, tandis que Harmanescu et al., (2011) ont révélé que la dose consommée des métaux était plus élevée chez les femmes que chez les hommes (par la consommation de légumes) [262,412]. Cependant, les valeurs recommandées se réfèrent souvent à l'apport total de métaux par toutes les voies d'absorption : ingestion, inhalation et contact cutané [412]. Ainsi, les valeurs de EDI pourraient être dépassées en cas d'une exposition supplémentaire, en particulier pour les enfants.

### **B. Estimation du risque non cancérigène et de l'indice de danger**

Les quotients de danger pour le Plomb, Cadmium, Mercure et Nickel pour la consommation de lait dans la zone étudiée pour les adultes et les enfants sont présentés dans le Tableau 90.

Les valeurs HQ obtenues étaient inférieures à 1, indiquant l'absence de risque potentiel pour la santé par la consommation de lait, dans la zone étudiée. Les HQ moyens calculés pour la consommation de lait ont diminué dans l'ordre suivant :  $HQ_{Pb} > HQ_{Hg} \geq HQ_{Cd} \geq HQ_{Ni}$  pour tous les groupes de population étudiés.

Nos résultats sont en concordance avec ce qui a été démontré dans la revue systématique de la littérature et réalisé dans le cadre de ce travail (synthèse bibliographique, Chapitre IV, Tableau 5 et Tableau 6). Sur les 17 études qui concernaient le Plomb dans le lait de chamelle incluses dans la revue, 15 études ont montré un risque non cancérigène négligeable et uniquement deux études ont montré un risque significatif pour la santé. Ces taux élevés ont été spécifiquement identifiés par Amin et al., (2008) et Damarany., (2016) en Égypte, où les HQ ont atteint 1,36 et 1,18 pour les adultes, ainsi que 1,589 et 1,831 pour les enfants, respectivement [188,194].

Parmi les 15 études examinant la présence de Cadmium dans le lait de chamelle, 14 ont conclu à un faible risque non cancérigène. Seule l'étude menée en Arabie saoudite par Ajrem et al. (2022) a présenté des résultats divergents, mettant en évidence un risque non cancérigène.

De même, la valeur de l'indice HQ pour le Nickel a dépassé 1 uniquement dans une seule étude sur les six s'intéressant à ce métal dans le lait de chamelle. Cette valeur spécifique était de 2,46 et était associée au lait cru de la région d'Aswan en Égypte [188].

Les valeurs HQ pour les enfants différaient significativement pour tous les métaux étudiés avec ceux des adultes. Dans cette étude, le groupe « enfants » semble être le plus exposé, ce qui est dû à leur faible poids corporel et à la consommation de lait plus importante.

Nos valeurs HQ étaient similaires à celles rapportées par Miclean et al., (2019) qui ont rapporté une valeur HQ de  $0,017 \pm 0,011$  pour le Plomb et  $0,019 \pm 0,009$  pour le Cadmium, associé à la consommation de lait de vache de Roumanie [258]. En Europe, les valeurs HQ rapportées du Plomb variaient de  $1,3 \cdot 10^{-2}$  à  $7,6 \cdot 10^{-2}$  [221,258,413,414].

Bien que ces valeurs soient inférieures à la limite de sécurité de 1, un contrôle strict est nécessaire pour vérifier la conformité des échantillons de lait. De plus, l'accumulation de Cadmium et de Plomb chez les ruminants provoque des effets toxiques, mais aussi chez les humains qui consomment du lait contaminé de façon chronique [150,353,415].

L'indice de risque non cancérigène (HI) calculé dans le cadre de notre étude (Figure 38) était inférieur à 1 pour tous les groupes de population étudiés, ce qui indique que la consommation de lait ne pose qu'un faible risque non cancérigène pour la santé humaine.

L'élément qui a le plus contribué à l'HI dans la majorité des échantillons était le Plomb. Le Plomb a apporté la plus grande contribution, suivi du Mercure, Cadmium et Nickel avec des valeurs de 68%, 8%, 15% et 9%, respectivement. Le HI moyen était environ deux fois plus élevé pour les enfants que pour les adultes, ce qui suggère que si plus d'aliments contaminés sont consommés, le risque peut augmenter de manière significative.

Ce fait est possible surtout si la consommation de lait est associée à la consommation de légumes cultivés dans des sols contaminés. L'EFSA préconise d'étudier le risque de métaux lourds dans tous les produits, y compris les légumes, les céréales, les racines, les fruits et la viande en plus du lait et les produits laitiers pour les enfants et les adolescents [213,214]. Ainsi, si l'on prenait en considération toutes les contaminations par exposition alimentaire, l'exposition à ces métaux pourrait être plus élevée.

De plus, les enfants sont particulièrement susceptibles de développer des effets non cancérigènes sur la santé, car leurs voies digestives peu développées favorisent l'absorption des métaux toxiques [416].



### C. Estimation du risque cancérigène pour le Plomb et le Cadmium

La description du risque de cancer peut être caractérisée selon trois niveaux ; une valeur limite inférieure de  $10^{-6}$  qui est la limite de sécurité, une valeur limite supérieure de  $10^{-4}$  qui est la limite du seuil de risque et enfin une valeur supérieure à  $10^{-3}$  qui est la limite du risque considérable [228].

Bien que divers facteurs comme l'âge, la race et le sexe soient importants dans le développement du cancer, de nombreuses études ont indiqué que l'exposition à des contaminants environnementaux tels que des éléments métalliques intensifient le risque de cancer [215,227]. Les valeurs moyennes pour les adultes et les enfants du risque cancérigène du Plomb pour le lait étaient inférieures aux valeurs de risque acceptables les plus basses, indiquant un risque cancérigène potentiel faible lié à la consommation de lait dans la région d'étude (Tableau 91). Nos résultats étaient inférieurs aux résultats rapportés par Kasozi et al., (2018) en Ouganda à  $0,847.10^{-4}$  et  $0,283.10^{-4}$  chez les enfants et les adultes, respectivement [417]. Abedi et al., (2020) en Iran ont rapporté des valeurs encore plus élevées chez les enfants et les adultes, allant de  $1,89.10^{-3}$  à  $2,45.10^{-3}$  et  $2,96.10^{-4}$  à  $3,85.10^{-4}$ , respectivement [175].

Le risque cancérigène moyen du Cadmium se situait entre  $10^{-6}$  et  $10^{-4}$  pour les adultes et les enfants, suggérant un potentiel risque cancérigène [229]. Le Cadmium s'est avéré être le contributeur le plus élevé au risque total de cancer pour tous les groupes de population, comme ceci a également été montré dans la revue systématique menée dans le cadre de cette thèse, où l'ensemble des 15 études de la revue démontrent un risque dépassant  $10^{-6}$  pour les adultes et les enfants, suggérant un potentiel risque cancérigène.

Le risque maximal de cancer est également identifié chez les enfants, avec une valeur 1,5 fois plus élevé que celui des adultes. En conséquence, le risque global cancérigène et non cancérigène apparaît légèrement plus élevé chez les enfants.

Le risque total de cancer était légèrement plus élevé chez les enfants. L'ingestion de lait de façon quotidienne peut être donc responsable de cancer chez les grands consommateurs de lait camelin.

Compte tenu de la nature cumulative du Plomb et du Cadmium et du fait que les enfants et en particulier les tout-petits dépendent principalement du lait pour se nourrir, cela pourrait être préoccupant pour ce groupe d'âge à long terme. Par conséquent, une évaluation régulière du niveau d'exposition alimentaire est essentielle.

Une évaluation sur « l'exposition alimentaire au Cadmium dans la population européenne » [213], montre que les principaux contributeurs à l'exposition au Cadmium, pour les adultes, les enfants et les adolescents, sont les féculents, les céréales et les produits à base de céréales. Cependant, et sans surprise, le lait et les produits laitiers sont les principales sources de Cadmium pour les nourrissons et les tout-petits. On suppose que l'exposition des enfants serait 2 à 3 fois supérieure à celle de la population générale sur la base du poids corporel [214].

De plus, bien que l'absorption de métaux par le lait soit une voie d'exposition importante, l'exposition aux métaux peut également se produire par l'ingestion d'autres catégories d'aliments ou par d'autres voies telles que l'inhalation ou le contact cutané. Ainsi, nos données sous-estiment les risques réels non cancérogènes et cancérogènes dans la zone d'étude.

Compte tenu de la toxicité des métaux lourds, de leurs cancérogénicités probables, des effets neurologiques et néphrotoxiques et des résultats reportés, nous recommandons fortement d'établir un système de surveillance continue spécifiquement dans les élevages de bétail proches des stations d'essence, le long des routes principales.

### III.5. Limites de l'étude

Même si notre étude représente une première au niveau du Sud algérien et a permis d'avoir une idée générale sur la pollution métallique du lait de chamelle en utilisant une méthode de contrôle non invasive, ce travail comporte plusieurs limites qui méritent d'être mentionnées :

- Les limitations de l'échantillonnage : en effet, le nombre d'échantillons récoltés par rapport à l'étendue de la zone d'échantillonnage peut rendre les résultats difficiles à interpréter ; le nombre de chameaux dans chaque ferme est étonnamment limité par rapport à la population cameline recensée dans la région.
- Seulement dix fermes ont été incluses dans l'étude, même si ces dernières ont été à notre connaissance les seuls qui vendent du lait à proximité des routes principales.
- Les limitations de la méthodologie de travail ont également pu affecter la validité et la fiabilité des résultats. Dans notre étude, la méthode d'échantillonnage utilisée consistait à prélever le lait d'un mélange de plusieurs chameaux de différents âges. Ceci empêche l'évaluation des métaux de façon individuelle et la compréhension de l'influence de l'âge sur cette accumulation. Une méthode d'échantillonnage plus précise aurait été nécessaire pour obtenir des résultats plus fiables et concluants.

- Les plantes échantillonnées ont été prélevées à un seul endroit dans chaque ferme, ce qui ne représente peut-être pas l'ensemble de l'alimentation des dromadaires. Les animaux ne consomment pas les mêmes végétaux, ce qui peut être un facteur de variabilité important dans l'exposition aux métaux. Par conséquent, il est possible que nos résultats ne soient pas représentatifs de l'exposition réelle des animaux.
- De plus, il aurait fallu connaître avec précision les sources de pollution dans les environs de chaque ferme et analyser une ferme non contaminée (sol, eau, plantes) afin d'observer les différences.
- L'absence d'un matériel certifié de référence peut aussi avoir un impact sur la véracité des concentrations des échantillons, même si les méthodes de dosages ont été validées analytiquement.

Conclusion

## CONCLUSION

Le lait de chamelle est utilisé comme substitut pour les enfants qui souffrent d'intolérance aux protéines de lait de vache et d'hypersensibilité alimentaire multiple. Comme toutes les denrées alimentaires, les métaux tels que le Cadmium, le Plomb, le Nickel et le Mercure sont présents à l'état de résidus et peuvent constituer une menace pour la santé des consommateurs.

L'objectif de cette étude était d'évaluer le risque sanitaire lié à la présence de ces métaux dans le lait et d'estimer le risque cancérigène et non cancérigène pour les consommateurs. Cette étude revêt une importance capitale, car elle a permis d'établir pour la première fois en Algérie un état des lieux de la concentration des métaux lourds dans le lait de chamelle de certains élevages de type intensif, le long de la route nationale qui relie Biskra à Ghardaïa.

120 échantillons de lait, ainsi que 40 échantillons de matrices environnementales (sol, eau d'abreuvement et plantes aux alentours) ont été prélevés dans dix élevages de type intensif pendant les saisons d'automne, d'hiver, de printemps et d'été.

Les concentrations moyennes de métaux lourds dans le lait cru de chamelle ont suivi l'ordre suivant Nickel > Plomb > Cadmium > Mercure. Les concentrations moyennes dans le lait de chamelle étaient de  $26,32 \pm 12,85 \mu\text{g/Kg}$ ,  $0,95 \pm 0,17 \mu\text{g/Kg}$ ,  $16,84 \pm 2,06 \mu\text{g/Kg}$  et  $0,50 \pm 0,18 \mu\text{g/Kg}$  pour le Plomb, le Cadmium, le Nickel et le Mercure respectivement. La concentration moyenne de Plomb était supérieure à la limite standard recommandée. Aucune norme n'est disponible pour les autres métaux, cependant nos résultats étaient généralement plus faibles que dans d'autres études publiées à travers le monde.

La concentration moyenne des métaux dans le lait de chamelle des élevages proches des stations d'essence était plus élevée que dans les élevages plus éloignés. De plus, une variation saisonnière non significative a été constatée avec un pic observé généralement pendant la période estivale.

L'étude de la relation entre les concentrations en polluants dans le lait et les concentrations dans les différents éléments de l'environnement a montré l'impact potentiel du sol et des plantes comme principale source de transfert des métaux.

L'évaluation du risque a quant à elle montré que les valeurs moyennes du risque non cancérigène et cancérigène étaient inférieures au seuil limite de toxicité. Ainsi, la consommation du lait de chamelle des élevages sélectionnés ne présente pas un risque notable pour la santé des consommateurs.

Cependant, ces risques sont plus importants pour les enfants en comparaison avec les adultes. De plus, l'exposition à de faible concentration en métaux n'est pas sans danger du fait de la multiplicité des sources d'exposition.

Grace à cette étude, il a été possible d'obtenir un premier regard sur les risques de contamination du lait de chamelle dans des élevages de type intensif potentiellement pollués et la situation est apparue moins catastrophique que ce qu'on pouvait le craindre.

Cependant, il reste important de réduire les risques pour la santé publique en imposant une réglementation stricte pour tous les éléments toxiques, en particulier le lait, par l'élaboration de contrôle de routine auprès des éleveurs. Aussi, une attention particulière doit être portée aux principales denrées alimentaires du marché (viandes, poissons, etc.) pour vérifier la présence de risques toxicologiques.

### **Perspectives et recommandations**

Les résultats de cette thèse ont indiqué que les concentrations de métaux dans le lait cru de chamelle sont affectées par l'environnement d'élevage notamment le sol et les plantes. Les dromadaires élevés dans des élevages à proximité des stations d'essence ont un risque plus élevé de produire du lait à plus forte teneur en métaux que les dromadaires élevés dans des zones non polluées.

Bien que les résultats de l'étude actuelle aient indiqué que la consommation de lait de chamelle ne constituait pas un danger pour la santé des consommateurs selon la norme établie par la Commission du *Codex Alimentarius*, une pollution modérée des élevages a été reportée. Afin d'enrichir ce travail, d'autres travaux seront nécessaires :

- Ainsi afin d'acquérir une cartographie de la pollution de la région nécessitera de fusionner différentes bases de données (toxicologiques, géologiques, hydrologiques) et/ou d'organiser une réunion avec tous les acteurs de l'industrie laitière et agricole pour fournir ces informations au niveau régional. Cette procédure ne sera pas simple à mettre en œuvre mais permettra d'avoir une cartographie sur les élevages les plus appropriés pour la production de lait camelin de bonne qualité.
- Plus d'échantillons devront être collectés dans la même zone pour augmenter la taille de l'ensemble de données actuel. En effet, le nombre d'échantillons utilisés pour les corrélations était faible, sur la base de l'écart-type estimé au sein et entre les exploitations. Il sera important d'augmenter le nombre de chameles pour diluer les effets des individus et mieux isoler l'effet de troupeau.

- Le nombre d'échantillons d'eau d'abreuvement et de plantes doit être augmenté et prélevé à des moments différents pour être en accord avec les échantillons de lait collectés. Les plantes ont été collectées pour évaluer la corrélation avec la teneur en métaux lourds dans le lait. Cependant, les plantes peuvent ne pas faire partie de l'alimentation du bétail. Par conséquent, les échantillons de nourritures du bétail devront également être collectés et mesurés.
- Des caractéristiques telles que le nombre de jours de lactation, le stade de lactation, la génétique et l'état de santé devront aussi être pris en compte.
- Au-delà de l'amélioration des connaissances sur le transfert des métaux lourds dans le lait, ce genre d'études pourrait confirmer les niveaux de métaux lourds et serait important pour assurer le bien-être des dromadaires.
- Selon plusieurs chercheurs, les niveaux de métaux dans le lait sont significativement liés à ceux dans le sang. La teneur en métaux lourds du sang, tels que la teneur en Plomb et Cadmium, peut servir de biomarqueur pour l'excrétion de ces métaux. La mesure de la teneur en métaux lourds dans les échantillons de sang pourrait également améliorer la compréhension de l'excrétion des métaux dans le lait et permettre de mieux isoler ou différencier les effets sur les animaux.

Toutes ces améliorations permettront de clarifier les relations entre la contamination du lait cru par les métaux et l'environnement du troupeau. Toutes ces études supplémentaires, si elles sont financées, pourraient également être utilisées pour le contrôle qualité par les directions de l'agriculture afin d'assurer la haute qualité du lait de chamelle.

La consommation de lait et de produits laitiers devrait augmenter dans les années à venir. L'élimination des métaux toxiques du lait et des produits laitiers semble indispensable mais peut ne pas être totalement réalisée même dans les pays développés.

Nous proposons comme recommandations l'implantation de lois alimentaires qui conduiront à un contrôle de la qualité du lait :

- L'Algérie devra mettre en place des commissions alimentaires chargées de réglementer et de surveiller la prévalence des métaux toxiques dans le lait et ses produits.
- Les aliments pour animaux, l'eau de boisson et l'utilisation d'hormones et d'antibiotiques chez les animaux laitiers devront être strictement surveillés pour contrôler le niveau de produits chimiques.

- Les unités de transformation du lait devront être sous surveillance stricte et l'état des instruments et des ustensiles impliqués dans la manipulation et la transformation du lait devront être à la hauteur pour assurer la qualité du lait transformé.
- Les bonnes pratiques sur la sécurité alimentaire, les bonnes pratiques de fabrication et le système de gestion devront être obligatoires pour chaque unité de transformation du lait.
- Les éleveurs devront être sensibilisés à la sécurité des aliments pour animaux, à son impact sur la qualité du lait et aux manières de manipuler le lait et les animaux laitiers en toute sécurité.
- Enfin, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour trouver des méthodes commercialement applicables et sûres pour la décontamination des métaux lourds dans le lait et les produits laitiers.
- De plus, l'état doit mettre la norme de Plomb dans le lait et renforcer le suivi de la qualité du lait de chamelle vendu sur les routes et doit être soumis à des analyses toxicologiques et partager les résultats avec la population, qui doit rester maître de ses choix éclairés.

En appelant à l'action, nous encourageons la communauté scientifique à intensifier ses efforts de recherche, à partager les connaissances et à collaborer à l'élaboration de stratégies visant à minimiser les risques liés à la consommation du lait de chamelle.



# Références bibliographiques

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

1. Lucey JA. Raw milk consumption: risks and benefits. *Nutrition Today*. 2015;50(4):189.
2. Pereira PC. Milk nutritional composition and its role in human health. *Nutrition*. 2014;30(6):619-27.
3. Konuspayeva G, Faye B, Bengoumi M. Mineral status in camel milk: a critical review. *Animal Frontiers*. 2022;12(4):52-60.
4. Ahamad SR, Raish M, Ahmad A, Shakeel F. Potential health benefits and metabolomics of camel milk by GC-MS and ICP-MS. *Biological trace element research*. 2017;175:322-30.
5. Licata P, Di Bella G, Potortì A, Lo Turco V, Salvo A, Dugo GM. Determination of trace elements in goat and ovine milk from Calabria (Italy) by ICP-AES. *Food Additives and Contaminants: Part B*. 2012;5(4):268-71.
6. Qu X-Y, Zheng N, Zhou X-W, Li S-L, Wang J-Q, Zhang W-J. Analysis and risk assessment of seven toxic element residues in raw bovine milk in China. *Biological trace element research*. 2018;183:92-101.
7. Rahimi E. Lead and cadmium concentrations in goat, cow, sheep, and buffalo milks from different regions of Iran. *Food chemistry*. 2013;136(2):389-91.
8. Kurajdová K, Táborecká-Petrovičová J, Kaščáková A. Factors influencing milk consumption and purchase behavior—evidence from Slovakia. *Procedia Economics and Finance*. 2015;34:573-80.
9. Dadar M, Fakhri Y, Shahali Y, Khaneghah AM. Contamination of milk and dairy products by *Brucella* species: A global systematic review and meta-analysis. *Food Research International*. 2020;128:108775.
10. Ataro A, McCrindle RI, Botha B, McCrindle CME, Ndibewu P. Quantification of trace elements in raw cow's milk by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). *Food chemistry*. 2008;111(1):243-8.
11. Chehma A. Productivité pastorale et productivité laitière en Algérie. *Lait de chamelle pour l'Afrique*. 2004:43.
12. Oulad Belkhir A, Chehma A, Faye B. Phenotypic variability of two principal Algerian camel's populations (Targui and Sahraoui). *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2013:231-7.
13. FAO. Production de lait de chamelle. 2023. Disponible sur: <https://www.fao.org/about/fr>. Consulté le : 31 Mai 2023
14. Cardoso RR, Santos R, Cardoso C, Carvalho M. Consumption of camel's milk by patients intolerant to lactose. A preliminary study. *Revista Alergia de Mexico*. 2010;57(1).



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

15. Benmeziane – Derradji F. Evaluation of camel milk: gross composition—a scientific overview. *Tropical Animal Health and Production*. 2021;53(2):308.
16. Herwig N, Stephan K, Panne U, Pritzkow W, Vogl J. Multi-element screening in milk and feed by SF-ICP-MS. *Food Chemistry*. 2011;124(3):1223-30.
17. Al wabel N. The pharmacokinetics and milk residual behaviour of tylosin in lactating Najdi ewes. 2008.
18. Dobrzanski Z, Kolacz R, Górecka H, Chojnacka K, Bartkowiak A. The content of microelements and trace elements in raw milk from cows in the Silesian region. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2005;14(5):685.
19. González-Montaña J-R, Senís E, Alonso A-J, Alonso M-E, Alonso M-P, Domínguez J-C. Some toxic metals (Al, As, Mo, Hg) from cow's milk raised in a possibly contaminated area by different sources. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26:28909-18.
20. Jeng S, Lee S, Lin S. Determination of cadmium and lead in raw milk by graphite furnace atomic absorption spectrophotometer. *Journal of dairy science*. 1994;77(4):945-9.
21. Oulad Belkhir A, Bouziane A, Chehma A, Faye B. La filière viande cameline dans le Sahara septentrional algérien. 2013.
22. Fguiri I, Atigui M, Sboui A, Samira A, Marzougui C, Dbara M, et al. Camel milk-clotting using plant extracts as a substitute to commercial rennet. *Journal of Chemistry*. 2021;2021:1-8.
23. Alhadrami G, Faye B. Camel. 2022.. In : *Encyclopedia of dairy sciences*. McSweeney Paul (ed.), McNamara John (ed.). Londres : Academic Press, 48-64. ISBN 978-0-12-818766-1
24. Saidi Y, Del Rio B, Senouci DE, Redruello B, Martinez B, Ladero V, et al. Polyphasic characterisation of non-starter lactic acid bacteria from Algerian raw Camel's milk and their technological aptitudes. *Food technology and biotechnology*. 2020;58(3):260-72.
25. Fettata HS. Caractérisation phénotypiques destroupeaux camélins dans la wilaya de ghardaia, et extraction de matériel génétique : université kasdi merbah–ouargla.
26. Faye B. The camel, new challenges for a sustainable development. *Tropical Animal Health and Production*. 2016;48(4):689-92.
27. Faye B. Role, distribution and perspective of camel breeding in the third millennium economies. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2015:318-27.
28. Faraz A, Waheed A, Mirza R, Ishaq H. Role of camel in food security: a perspective aspect. *J Fish Livest Prod*. 2019;7(01):290.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

29. Faye B, Konuspayeva G, Agut-Labordère D, Redon B. Le chameau de Bactriane dans les vicissitudes de l'Histoire depuis 1917. Les vaisseaux du désert et des steppes: Les camélidés dans l'Antiquité (*Camelus dromedarius* et *Camelus bactrianus*). 2020:265-72.
30. FAO. Production de lait de chamelle. 2023. Disponible sur: <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/dairy-animals/camels/en/>. Consulté le : 31 Mai 2023
31. Faye B. How many large camelids in the world? A synthetic analysis of the world camel demographic changes. *Pastoralism*. 2020;10(1):1-20.
32. Boukhechem S, Dib AL, Bougherara H, Bouaziz A, Kadja L, Ghoulal K, et al., editors. Breeding and Nutrition of Camels in Algeria. *Biology and Life Sciences Forum*; 2023 : MDPI.
33. Chehma A, Mahma H, Trabelsi H, Huguenin J, editors. Place of the Dromedary in the Ecological Balance of Its Saharan Ecosystem. *Biology and Life Sciences Forum*; 2023 : MDPI.
34. OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029. Paris, OECD Publishing.
35. Laameche F, Chehma A. La chamelle laitière: pour une nouvelle stratégie durable de la filière lait en régions sahariennes; cas de la région de Ghardaïa, Algérie. *Livestock Research for Rural Development*. 2019;31(9).
36. Belhadia M, Bourbouze A, Djermoun A. Production et mise sur le marché du lait en Algérie, entre formel et informel: stratégies des éleveurs du périmètre irrigué du Haut-Cheliff. *New médit*. 2014;13(1):41-50.
37. Faye B, Konuspayeva G, Magnan C. Lecture d'actualité: l'élevage des grands camélidés. *Viandes & Produits Carnés*. 2023:1.
38. AL-Moosawi ZH, Almahdawi MK, Al-Charak AG. Camel milk as an integrated food and its physical and chemical properties with therapeutic characteristics. 2023.
39. Seifu E. Recent advances on camel milk: Nutritional and health benefits and processing implications—A review. *AIMS Agriculture and Food*. 2022;7(4):777-804.
40. Al-Jassim R, Sejian V. Climate change and camel production: impact and contribution. *J Camelid Sci*. 2015;8:1-17.
41. Nagy P, Juhasz J. Review of present knowledge on machine milking and intensive milk production in dromedary camels and future challenges. *Tropical Animal Health and Production*. 2016;48(5):915-26.
42. Ayadi M, Hammadi M, Khorchani T, Barmat A, Atigui M, Caja G. Effects of milking interval and cisternal udder evaluation in Tunisian Maghrebi dairy dromedaries (*Camelus dromedarius* L.). *Journal of dairy science*. 2009;92(4):1452-9.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

43. Seifu E. Analysis on the contributions of and constraints to camel production in Shinile and Jijiga zones, eastern Ethiopia. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*. 2009;103(3):213-24.
44. Sawaya W, Khalil J, Al-Shalhat A, Al-Mohammad H. Chemical composition and nutritional quality of camel milk. *Journal of Food Science*. 1984;49(3):744-7.
45. Bakry IA, Yang L, Farag MA, Korma SA, Khalifa I, Cacciotti I, et al. A comprehensive review of the composition, nutritional value, and functional properties of camel milk fat. *Foods*. 2021;10(9):2158.
46. Vincenzetti S, Cammertoni N, Rapaccetti R, Santini G, Klimanova Y, Zhang J-J, et al. Nutraceutical and Functional Properties of Camelids' Milk. *Beverages*. 2022;8(1):12.
47. Swelum AA, El-Saadony MT, Abdo M, Ombarak RA, Hussein EO, Suliman G, et al. Nutritional, antimicrobial and medicinal properties of Camel's milk: A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2021;28(5):3126-36.
48. Kanca H. Milk production and composition in ruminants under heat stress. *Nutrients in Dairy and their Implications on Health and Disease: Elsevier*; 2017. p. 97-109.
49. Barłowska J, Sz wajkowska M, Litwińczuk Z, Król J. Nutritional value and technological suitability of milk from various animal species used for dairy production. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 2011;10(6):291-302.
50. Ho TM, Zou Z, Bansal N. Camel milk: A review of its nutritional value, heat stability, and potential food products. *Food Research International*. 2022;153:110870.
51. Ismail LC, Osaili TM, Mohamad MN, Zakaria H, Ali A, Tarek A, et al. Camel milk consumption patterns and perceptions in the UAE: A cross-sectional study. *Journal of Nutritional Science*. 2022;11:e59.
52. El-Agamy EI, Nawar M, Shamsia SM, Awad S, Haenlein GF. Are camel milk proteins convenient to the nutrition of cow milk allergic children? *Small Ruminant Research*. 2009;82(1):1-6.
53. Al Kanhal HA. Compositional, technological and nutritional aspects of dromedary camel milk. *International Dairy Journal*. 2010;20(12):811-21.
54. Muthukumarán MS, Mudgil P, Baba WN, Ayoub MA, Maqsood S. A comprehensive review on health benefits, nutritional composition and processed products of camel milk. *Food Reviews International*. 2022:1-37.
55. Al-Attas A. Determination of essential elements in milk and urine of camel and in *Nigella sativa* seeds. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*. 2009;42(4):59-67.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

56. Abbaspour N, Hurrell R, Kelishadi R. Review on iron and its importance for human health. *Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences*. 2014;19(2):164.
57. Lobo V, Patil A, Phatak A, Chandra N. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy reviews*. 2010;4(8):118.
58. Aqib AI, Kulyar MF-e-A, Ashfaq K, Bhutta ZA, Shoaib M, Ahmed R. Camel milk insuline: Pathophysiological and molecular repository. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;88:497-504.
59. Akbar N. Science of camel and yak milks: human nutrition and health perspectives. *Food and Nutrition sciences*. 2011;2011.
60. Farah Z, Rettenmaier R, Atkins D. Vitamin content of camel milk. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*. 1992;62(1):30-3.
61. Faye B, Konuspayeva G, Bengoumi M. Vitamins of camel milk: a comprehensive review. *J Camelid Sci*. 2019;12:17-32.
62. Faraz A, Waheed A, Tauqir N, Mirza R, Ishaq H, Nabeel M. Characteristics and composition of camel (*Camelus dromedarius*) milk: The white gold of desert. *Adv Anim Vet Sci*. 2020;8(7):766-70.
63. Hammam AR. Compositional and therapeutic properties of camel milk: a review. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2019:148-52.
64. Singh R, Sahoo A. Biochemical Properties of Camel Milk-Uniqueness and Its Therapeutic Potential.
65. Maryniak NZ, Sancho AI, Hansen EB, Bøgh KL. Alternatives to cow's milk-based infant formulas in the prevention and management of cow's milk allergy. *Foods*. 2022;11(7):926.
66. Mihic T, Rainkie D, Wilby KJ, Pawluk SA. The therapeutic effects of camel milk: a systematic review of animal and human trials. *Journal of evidence-based complementary & alternative medicine*. 2016;21(4):NP110-NP26.
67. Agrawal RP, Agrawal R, Ghazzawi HA. Potential anti-diabetic effect of camel milk. *Handbook of Research on health and environmental benefits of camel products: IGI Global*; 2020. p. 185-96.
68. Almehdar HA, El-Baky NA, Alhaider AA, Redwan EM. Immunogenicity comparison of lactoferrin purified from Saudi Arabia camel clans milk. *Human Antibodies*. 2019;27(2):85-90.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

69. Ibrahim HM, Mohammed-Geba K, Tawfic AA, El-Magd MA. Camel milk exosomes modulate cyclophosphamide-induced oxidative stress and immuno-toxicity in rats. *Food & function*. 2019;10(11):7523-32.
70. Taylor RC. Alternative medicine and the medical encounter in Britain and the United States. *Alternative Medicines: Routledge*; 2022. p. 191-228.
71. Yagil R, Zagorski O, Van Creveld C, Saran A, editors. Science and camel's milk production. *Actes du Colloque: Dromadaires et chameaux animaux laitier; 1994 : Expansion Scientifique Francais Paris*.
72. Malik A, Al-Senaïdy A, Skrzypczak-Jankun E, Jankun J. A study of the anti-diabetic agents of camel milk. *International journal of molecular medicine*. 2012;30(3):585-92.
73. Ayoub MA, Palakkott AR, Ashraf A, Iratni R. The molecular basis of the anti-diabetic properties of camel milk. *Diabetes Research and Clinical Practice*. 2018;146:305-12.
74. Ashraf A, Mudgil P, Palakkott A, Iratni R, Gan C-Y, Maqsood S, et al. Molecular basis of the anti-diabetic properties of camel milk through profiling of its bioactive peptides on dipeptidyl peptidase IV (DPP-IV) and insulin receptor activity. *Journal of dairy science*. 2021;104(1):61-77.
75. Korish AA, Gader AGMA, Alhaider AA. Comparison of the hypoglycemic and antithrombotic (anticoagulant) actions of whole bovine and camel milk in streptozotocin-induced diabetes mellitus in rats. *Journal of dairy science*. 2020;103(1):30-41.
76. Amel S, Aroua A, Omrane B, Touhami K. Antidiabetic Activity of Coagulum from Camel Milk on Experimental Diabetes. *Am J Food Sci Health*. 2020;6(4):128-31.
77. Korish AA, Arafah MM. Camel milk ameliorates steatohepatitis, insulin resistance and lipid peroxidation in experimental non-alcoholic fatty liver disease. *BMC complementary and alternative medicine*. 2013;13(1):1-12.
78. Korish AA, Gader AGA, Korashy HM, Al-Drees AM, Alhaider AA, Arafah MM. Camel milk attenuates the biochemical and morphological features of diabetic nephropathy: inhibition of Smad1 and collagen type IV synthesis. *Chemico-biological interactions*. 2015;229:100-8.
79. Korish A. The antidiabetic action of camel milk in experimental type 2 diabetes mellitus: an overview on the changes in incretin hormones, insulin resistance, and inflammatory cytokines. *Hormone and Metabolic Research*. 2014;46(06):404-11.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

80. Khan A, Alzohairy M, Mohieldein A. Antidiabetic effects of camel milk in streptozotocin-induced diabetic rats. *American Journal of Biochemistry and Molecular Biology*. 2013;3(1):151-8.
81. Ejtahed HS, Naslaji AN, Mirmiran P, Yeganeh MZ, Hedayati M, Azizi F, et al. Effect of camel milk on blood sugar and lipid profile of patients with type 2 diabetes: a pilot clinical trial. *International journal of endocrinology and metabolism*. 2015;13(1).
82. Mohamad RH, Zekry ZK, Al-Mehdar HA, Salama O, El-Shaieb SE, El-Basmy AA, et al. Camel milk as an adjuvant therapy for the treatment of type 1 diabetes: verification of a traditional ethnomedical practice. *Journal of medicinal food*. 2009;12(2):461-5.
83. Agrawal R, Beniwal R, Kochar D, Tuteja F, Ghorui S, Sahani M, et al. Camel milk as an adjunct to insulin therapy improves long-term glycemic control and reduction in doses of insulin in patients with type-1 diabetes: a 1 year randomized controlled trial. *Diabetes research and clinical practice*. 2005;68(2):176-7.
84. Agrawal R, Jain S, Shah S, Chopra A, Agarwal V. Effect of camel milk on glycemic control and insulin requirement in patients with type 1 diabetes: 2-years randomized controlled trial. *European journal of clinical nutrition*. 2011;65(9):1048-52.
85. Agrawal RP, Saran S, Sharma P, Gupta RP, Kochar DK, Sahani MS. Effect of camel milk on residual  $\beta$ -cell function in recent onset type 1 diabetes. *Diabetes research and clinical practice*. 2007;77(3):494-5.
86. Mullaicharam A. A review on medicinal properties of camel milk. *World Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2014:237-42.
87. Baubekova A, Kalimbetova A, Akhmetsadykova S, Konuspayeva G, Faye B. Comparison of d and l-lactate content in cow and camel milk. 2015.
88. Zibae S, Yousefi M, Taghipour A, Kiani MA, Noras MR. Nutritional and therapeutic characteristics of camel milk in children: a systematic review. *Electronic physician*. 2015;7(7):1523.
89. Berhe T, Seifu E, Ipsen R, Kurtu MY, Hansen EB. Processing challenges and opportunities of camel dairy products. *International journal of food science*. 2017;2017.
90. Shabo Y, Barzel R, Margoulis M, Yagil R. Camel milk for food allergies in children. *IMAJ-RAMAT GAN*-. 2005;7(12):796.
91. Alhaider AA, Abdel Gader AGM, Almeshaal N, Saraswati S. Camel milk inhibits inflammatory angiogenesis via downregulation of proangiogenic and proinflammatory cytokines in mice. *Apmis*. 2014;122(7):599-607.





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

92. Salwa MQ, Lina AK. Antigenotoxic and anticytotoxic effect of camel milk in mice treated with cisplatin. *Saudi journal of biological sciences*. 2010;17(2):159-66.
93. Cardoso R, Ponte M, Leite V. Protective action of camel milk in mice inoculated with *Salmonella enterica*. *Isr Med Assoc J*. 2013;15.
94. Al-Ayadhi LY, Halepoto DM, Al-Dress AM, Mitwali Y, Zainah R. Behavioral benefits of camel milk in subjects with autism spectrum disorder. *J Coll Physicians Surg Pak*. 2015;25(11):819-23.
95. Kandeel M, El-Deeb W. The application of natural camel milk products to treat autism-spectrum disorders: Risk assessment and meta-analysis of randomized clinical trials. *Bioinorganic Chemistry and Applications*. 2022;2022.
96. Al-Ayadhi LY, Elamin NE. Camel milk as a potential therapy as an antioxidant in autism spectrum disorder (ASD). *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2013;2013.
97. Bashir S, Al-Ayadhi LY. Effect of camel milk on thymus and activation-regulated chemokine in autistic children: double-blind study. *Pediatric research*. 2014;75(4):559-63.
98. Dallak M. Camel's milk protects against cadmium chloride-induced hypochromic microcytic anemia and oxidative stress in red blood cells of white albino rats. *Am J Pharmacol Toxicol*. 2009;4(4):134-41.
99. Al-Hashem F. Camel's milk protects against aluminum chloride-induced toxicity in the liver and kidney of white albino rats. *Am J Biochem Biotechnol*. 2009;5(3):98-109.
100. Darwish HA, Abd Raboh NR, Mahdy A. Camel's milk alleviates alcohol-induced liver injury in rats. *Food and Chemical Toxicology*. 2012;50(5):1377-83.
101. Duffus JH. "Heavy Metals"—A Meaningless Term. *Chemistry International--Newsmagazine for IUPAC*. 2001;23(6):163-7..
102. Foster, W. (1936). *Inorganic Chemistry* (Niels Bjerrum).
103. Clifford, A. F. (1964). *International encyclopedia of chemical science*. Princeton, NJ: Van Nostrand.
104. Grant J. *Hackh s Chemical Dictionary*, 1969. 175.
105. Gove PB. *New International Dictionary*. Springfield, MA: Merriam-Webster Inc. 1986.
106. Arnstein H. *Concise encyclopedia of biochemistry*: Edited by T. Scott and M. Brewer Walter de Gruyter; Berlin 1983 ii+ 520 pages. DM 59.00, \$29.90. : Wiley Online Library; 1984.
107. Davies BE, editor *Consequences of environmental contamination by lead mining in Wales. Ecological Effects of In Situ Sediment Contaminants: Proceedings of an International*



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

Workshop held in Aberystwyth, Wales—1984; 1987 : Springer.104. Weinheim1994. Lexikon der Okotoxikologie.

108. Meyer AH. RÖMPP Lexikon Lebensmittelchemie, 2. Auflage, 2006: Georg Thieme Verlag; 2014.

109. Thornton I. Metals in the global environment: facts and misconceptions: International Council on Metals and the Environment; 1995.

110. EPA US. EPA's Terms of Environment. Washington2000.

111. Rand GM, Wells PG, McCarty LS. "Introduction to aquatic toxicology". Fundamentals of Aquatic Toxicology. G. M. Rand ed. Washington DC1995.

112. Harrison P, Waites G. The Cassell Dictionary of Chemistry: Cassell; 1998.

113. Venugopal B, Luckey TD. Toxicology of nonradio-active heavy metals and their salts. Heavy Metal Toxicity, Safety and Hormology. D. Hutcheson ed. George Thieme, Stuttgart 1975.

114. Lyman WJ. Transport and transformation processes. Fundamentals of Aquatic Toxicology. G. M. Rand ed. Washington DC 1995.

115. Phipps DA. Chemistry and biochemistry of trace metals in biological systems. Effect of heavy Metal Pollution on Plants. N. W. Lepp ed. Barking: Applied Science Publishers; 1981

116. Harbison RD, Bourgeois MM, Johnson GT. Hamilton and hardy's industrial toxicology: John Wiley & Sons; 2015.

117. Goullé J, Sausseureau E, Lacroix C, Guerbet M. Traité de toxicologie médico-judiciaire. Re: Chapitre 24. : Métaux; 2012.

118. Nordberg GF, Nordberg M, Costa M. Toxicology of metals: overview, definitions, concepts, and trends. Handbook on the Toxicology of Metals. 2022:1-14.

119. Toprak MS, Karlsson HL, Fadeel B. Handbook on the Toxicology of Metals. 2014.

120. Kumar A, Kumar A, MMS C-P, Chaturvedi AK, Shabnam AA, Subrahmanyam G, et al. Lead toxicity: health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches. International journal of environmental research and public health. 2020;17(7):2179.

121. Tong S, Schirnding YEv, Prapamontol T. Environmental lead exposure: a public health problem of global dimensions. Bulletin of the world health organization. 2000;78(9):1068-77.

122. Algérie Service Presse. La généralisation de l'essence sans plomb a permis des "gains considérables" 2022. Available from: <https://www.aps.dz/economie/138797-la-generalisation-de-l-essence-sans-plomb-a-permis-des-gains-considerables>. Consulté le 31 Mai 2023



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

123. Ara A, Usmani JA. Lead toxicity: a review. *Interdisciplinary toxicology*. 2015;8(2):55-64.
124. Witkowska D, Słowik J, Chilicka K. Heavy metals and human health: Possible exposure pathways and the competition for protein binding sites. *Molecules*. 2021;26(19):6060.
125. National Toxicology Program. Draft NTP Monograph on Health Effects of Low-Level Lead. US Department of Health and Human Services. 2011.
126. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Inorganic and organic lead compounds. *Inorganic and Organic Lead Compounds: International Agency for Research on Cancer*; 2006.
127. Faroon O, Ashizawa A, Wright S, Tucker P, Jenkins K, Ingerman L, et al. Toxicological profile for cadmium. 2013.
128. Bawaskar HS, Himmatrao Bawaskar P, Himmatrao Bawaskar P. Chronic renal failure associated with heavy metal contamination of drinking water: a clinical report from a small village in Maharashtra. *Clinical Toxicology*. 2010;48(7):768-.
129. Gobe G, Crane D. Mitochondria, reactive oxygen species and cadmium toxicity in the kidney. *Toxicology letters*. 2010;198(1):49-55
130. Waalkes MPJJoib. Cadmium carcinogenesis in review. 2000;79(1-4):241-4.
131. Morisset T, Ramirez-Martinez A, Wesolek N, Roudot A-C. Probabilistic mercury multimedia exposure assessment in small children and risk assessment. *Environment international*. 2013;59:431-41.
132. Sundseth K, Pacyna JM, Pacyna EG, Pirrone N, Thorne RJ. Global sources and pathways of mercury in the context of human health. *International journal of environmental research and public health*. 2017;14(1):105.
133. Bensefa-Colas L, Andujar P, Descatha A. Mercury poisoning. *La Revue de medecine interne*. 2011;32(7):416-24.
134. Bernhoft RA. Mercury toxicity and treatment: a review of the literature. *Journal of environmental and public health*. 2012;2012.
135. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Mercury and mercury compounds. Beryllium, Cadmium, Mercury, and Exposures in the Glass Manufacturing Industry: *International Agency for Research on Cancer*; 1993.
136. Duda-Chodak A, Blaszczyk U. The impact of nickel on human health. *Journal of Elementology*. 2008;13(4):685-93.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

137. Boudebbouz A, Boudalia S, Bousbia A, Gueroui Y, Boussadia MI, Chelaghmia ML, et al. Determination of Heavy Metal Levels and Health Risk Assessment of Raw Cow Milk in Guelma Region, Algeria. *Biological Trace Element Research*. 2023;201(4):1704-16.
138. Yan M, Niu C, Li X, Wang F, Jiang S, Li K, et al. Heavy metal levels in cow's milk and its health risk assessment: A systematic review of studies in China. *Science of The Total Environment*. 2022:158161.
139. Konuspayeva G, Jurjanz S, Loiseau G, Barci V, Akhmetsadykova S, Meldebekova A, et al. Contamination of camel milk (heavy metals, organic pollutants and radionuclides) in Kazakhstan. 2011.
140. Vidovic M, Sadibasic A, Cupic S, Lausevic M. Cd and Zn in atmospheric deposit, soil, wheat, and milk. *Environmental Research*. 2005;97(1):26-31.
141. Zhou X, Zheng N, Su C, Wang J, Soyeurt H. Relationships between Pb, As, Cr, and Cd in individual cows' milk and milk composition and heavy metal contents in water, silage, and soil. *Environmental Pollution*. 2019;255:113322.
142. Abdu N, Abdullahi AA, Abdulkadir A. Heavy metals and soil microbes. *Environmental chemistry letters*. 2017;15:65-84.
143. Bhatia I, Choudhri G. Lead poisoning of milk--the basic need for the foundation of human civilization. *Indian Journal of Public Health*. 1996;40(1):24-6.
144. Simsek O, Gültekin R, Öksüz O, Kurultay S. The effect of environmental pollution on the heavy metal content of raw milk. *Food/Nahrung*. 2000;44(5):360-3.
145. Alloway B. Soil processes and the behaviour of metals. *Heavy metals in soils*. 1995;13:3488.
146. He ZL, Yang XE, Stoffella PJ. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace elements in Medicine and Biology*. 2005;19(2-3):125-40.
147. Tahir M, Iqbal M, Abbas M, Tahir M, Nazir A, Iqbal DN, et al. Comparative study of heavy metals distribution in soil, forage, blood and milk. *Acta Ecologica Sinica*. 2017;37(3):207-12.
148. Jurjanz S, Rychen G, Feidt C. Dairy livestock exposure to persistent organic pollutants and their transfer to milk: A review. *Impact of pollution on animal products*. 2008:63-83.
149. Peralta-Videa JR, Lopez ML, Narayan M, Saupe G, Gardea-Torresdey J. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain. *The international journal of biochemistry & cell biology*. 2009;41(8-9):1665-77.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

150. Cai Q, Long M-L, Zhu M, Zhou Q-Z, Zhang L, Liu J. Food chain transfer of cadmium and lead to cattle in a lead–zinc smelter in Guizhou, China. *Environmental Pollution*. 2009;157(11):3078-82.
151. Dey S, Swarup D. Reports from Developing Countries: Lead Concentration in Bovine Milk in India. *Archives of Environmental Health: An International Journal*. 1996;51(6):478-9.
152. Faye B, Bengoumi M. *Camel clinical biochemistry and hematology*: Springer; 2018.
153. Gundacker C, Zödl B. Heavy metals in breast milk: Implications for toxicity. *Reviews in Food and Nutrition Toxicity*: CRC Press; 2005. p. 1-28.
154. Aggarwal A, Verma T, Ghosh S. Heavy Metal Residues in Milk and Milk Products and Their Detection Method. *Trends and Innovations in Food Science*: IntechOpen; 2022.
155. Oskarsson A, Hallén IP, Sundberg J, Grawé KP. Risk assessment in relation to neonatal metal exposure. *Analyst*. 1998;123(1):19-23.
156. Coni E, Bocca B, Galoppi B, Alimonti A, Caroli S. Identification of chemical species of some trace and minor elements in mature breast milk. *Microchemical journal*. 2000;67(1-3):187-94.
157. Hallén IP, Norrgren L, Oskarsson A. Distribution of lead in lactating mice and suckling offspring with special emphasis on the mammary gland. *Archives of toxicology*. 1996;70:237-43.
158. Sundberg J, Ersson B, Lönnerdal B, Oskarsson A. Protein binding of mercury in milk and plasma from mice and man—a comparison between methylmercury and inorganic mercury. *Toxicology*. 1999;137(3):169-84.
159. Bernard A. Cadmium & its adverse effects on human health. *Indian Journal of Medical Research*. 2008;128(4):557-64.
160. Su C, Zhang J, Li Z, Zhao Q, Liu K, Sun Y, et al. Accumulation and Depletion of Cadmium in the Blood, Milk, Hair, Feces, and Urine of Cows During and After Treatment. *Biological trace element research*. 2017;175:122-8.
161. Sharma R, Street J, Verma M, Shupe J. Cadmium uptake from feed and its distribution to food products of livestock. *Environmental Health Perspectives*. 1979;28:59-66.
162. Konuspayeva GS. Camel milk composition and nutritional value. *Handbook of research on health and environmental benefits of camel products*: IGI global; 2020. p. 15-40.
163. Agrawal R, Kochar D, Sahani M, Tuteja F, Ghorui S. Hypoglycemic activity of camel milk in streptozotocin induced diabetic rats. *Int J Diab Dev Countries*. 2004;24:47-9.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

164. Yassin MH, Soliman MM, Mostafa SA-E, Ali HA-M. Antimicrobial effects of camel milk against some bacterial pathogens. *Journal of Food and Nutrition Research*. 2015;3(3):162-8.
165. Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew BB, Beeregowda KN. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary toxicology*. 2014;7(2):60.
166. Järup L. Hazards of heavy metal contamination. *British medical bulletin*. 2003;68(1):167-82.
167. Adamse P, Van der Fels-Klerx H, de Jong J. Cadmium, lead, mercury and arsenic in animal feed and feed materials—trend analysis of monitoring results. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2017;34(8):1298-311.
168. Akhmetsadykova S. Impact de la pollution sur la qualité du lait de chamelle au Kazakhstan : Montpellier SupAgro; 2012.
169. Ismail A, Riaz M, Akhtar S, Goodwill JE, Sun J. Heavy metals in milk: global prevalence and health risk assessment. *Toxin Reviews*. 2019;38(1):1-12.
170. Rebelo FM, Caldas ED. Arsenic, lead, mercury and cadmium: Toxicity, levels in breast milk and the risks for breastfed infants. *Environmental research*. 2016;151:671-88.
171. Llobet J, Falco G, Casas C, Teixido A, Domingo J. Concentrations of arsenic, cadmium, mercury, and lead in common foods and estimated daily intake by children, adolescents, adults, and seniors of Catalonia, Spain. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2003;51(3):838-42.
172. Hooda P, McNulty D, Alloway B, Aitken M. Plant availability of heavy metals in soils previously amended with heavy applications of sewage sludge. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1997;73(4):446-54.
173. Landrigan P, Nordberg M, Lucchini R, Nordberg G, Grandjean P, Iregren A, et al. The declaration of Brescia on prevention of the neurotoxicity of metals. *American journal of industrial medicine*. 2007;50(10):709.
174. Boudebouz A, Boudalia S, Bousbia A, Habila S, Boussadia MI, Gueroui Y. Heavy metals levels in raw cow milk and health risk assessment across the globe: A systematic review. *Science of the Total Environment*. 2021;751:141830.
175. Abedi A-S, Nasser E, Esfarjani F, Mohammadi-Nasrabadi F, Hashemi Moosavi M, Hoseini H. A systematic review and meta-analysis of lead and cadmium concentrations in cow milk in Iran and human health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:10147-59.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

176. Codex Alimentarius . Lait et produits laitiers. Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires: . 2007. p. 120-9.
177. European Commission . Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Off J Eur Union. 2006;364:5-24.
178. Subirana M, Solá I, Garcia JM, Gich I, Urrútia G. A nursing qualitative systematic review required MEDLINE and CINAHL for study identification. *Journal of clinical epidemiology*. 2005;58(1):20-5.
179. Fakhri Y, Abtahi M, Atamaleki A, Raoofi A, Atabati H, Asadi A, et al. The concentration of potentially toxic elements (PTEs) in honey: A global systematic review and meta-analysis and risk assessment. *Trends in food science & technology*. 2019;91:498-506.
180. Atamaleki A, Yazdanbakhsh A, Fakhri Y, Mahdipour F, Khodakarim S, Khaneghah AM. The concentration of potentially toxic elements (PTEs) in the onion and tomato irrigated by wastewater: a systematic review; meta-analysis and health risk assessment. *Food research international*. 2019;125:108518.
181. Atamaleki A, Sadani M, Raoofi A, Miri A, Bajestani SG, Fakhri Y, et al. The concentration of potentially toxic elements (PTEs) in eggs: a global systematic review, meta-analysis and probabilistic health risk assessment. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;95:1-9.
182. Barnes DG, Dourson M, Preuss P, Bellin J, Derosa C, Engler R, et al. Reference dose (RfD): description and use in health risk assessments. *Regulatory toxicology and pharmacology*. 1988;8(4):471-86.
183. Joint, F. A. O., & WHO Expert Committee on Food Additives. World Health O (2012) Safety evaluation of certain food additives and contaminants: prepared by the Seventy fourth meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). World Health Organization, Geneva.
184. US Institute of Medicine Panel on Micronutrients (USIMPM). 2001. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK222310/> National Academies Press Washington.
185. Avigliano E, Lozano C, Plá RR, Volpedo AV. Toxic element determination in fish from Paraná River Delta (Argentina) by neutron activation analysis: Tissue distribution and

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

accumulation and health risk assessment by direct consumption. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2016;54:27-36.

186. Kamunda C, Mathuthu M, Madhuku M. Health risk assessment of heavy metals in soils from Witwatersrand Gold Mining Basin, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016;13(7):663.

187. Farokhneshat F, Mahvi A, Jamali Y. Carcinogenic and non-carcinogenic risk assessment of chromium in drinking water sources: Birjand, Iran. *Research Journal of Environmental Toxicology*. 2016;10(3):166-71.

188. Amin T, Ibrahim M, Abou El Nile M, Esmail T. Evaluation of Chemical Quality of Camel's and Cow's Milk with Special Reference to Some Heavy Metal Residues. *Journal of High Institute of Public Health*. 2008;38(1):168-87.

189. Meldebekova A, Konuspayeva G, Diacono E, Faye B, editors. Heavy Metals and trace elements content in camel milk and shubat from Kazakhstan. *Impact of Pollution on Animal Products*; 2008 : Springer.

190. Diacono E, Faye B, Meldebekova A, Konuspayeva G, editors. Plant, water and milk pollution in Kazakhstan. *Impact of Pollution on Animal Products*; 2008 : Springer.

191. Konuspayeva G, Faye B, Loiseau G, Diacono E, Akhmetsadykova S. Pollution of camel milk by heavy metals in Kazakhstan. 2009.

192. Elbagermi M, Alajtal A, Edwards H. A comparative study on the physicochemical parameters and trace elements in raw milk samples collected from Misurata-Libya. *SOP transactions on analytical chemistry*. 2014;1(2):15-23.

193. Abushaala FA, Bayoumi MA, editors. Camel milk metal's status, a mini survey on Libyan camel milk. *8th International Toxicology Symposium in Africa*; 2016.

194. Damarany A. Concentrations of Sodium, Potassium, Copper, Zinc and Heavy Metals in Camel Milk Reared Under Pasture and Farm Conditions in South Egypt. *Journal of Animal and Poultry Production*. 2016;7(7):275-8.

195. Soltan M, Al-Ayed A, Ismail M, Shadeed M. Effect of the environmental factors on some element contents in camel and sheep milks: A comparative study between Qassim and Riyadh regions, KSA. *International Research Journal of Public and Environmental Health*. 2017.

196. Mostafidi M, Moslehisad M, Piravivanak Z, Pouretedal Z. Evaluation of mineral content and heavy metals of dromedary camel milk in Iran. *Food Science and Technology*. 2016;36:717-23.





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

197. Ahmad I, Zaman A, Samad N, Ayaz MM, Rukh S, Akbar A, et al. Atomic absorption spectrophotometry detection of heavy metals in milk of camel, cattle, buffalo and goat from various areas of Khyber-Pakhtunkhwa (KPK). *Pakistan J Anal Bioanal Tech.* 2017;8(3):100367.
198. Parsaei P, Rahimi E, Shakerian A. Concentrations of cadmium, lead and mercury in raw bovine, ovine, caprine, buffalo and camel milk. *Polish Journal of Environmental Studies.* 2019;28(6):4311.
199. Chen L, Li X, Li Z, Deng L. Analysis of 17 elements in cow, goat, buffalo, yak, and camel milk by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). *RSC advances.* 2020;10(12):6736-42.
200. Shar Z, Pirhot O, Shar H, Channa M. Assessing the risk of heavy metals contamination in milk from Pakistan. *Int J Sci Res Arch.* 2021;3(01):107-13.
201. Bougrinat AE. Évaluation de la contamination du lait des chameelles (*Camelus dromedarius*) par le cadmium à ouargla. Université Kasdi Merbah Ouargla; 2021.
202. Bahri NE-H, Brek S. Evaluation du taux de plomb dans le lait de chameelles : université kasdi merbah-ouargla; 2021.
203. Ajarem JS, Hegazy AK, Allam GA, Allam AA, Maodaa SN, Mahmoud AM. Heavy metal accumulation, tissue injury, oxidative stress, and inflammation in dromedary camels living near petroleum industry sites in Saudi Arabia. *Animals.* 2022;12(6):707.
204. Kamal GM, Rehmani MN, Iqbal SZ, Uddin J, Nazir S, Rehman JU, et al. The determination of potentially toxic elements (PTEs) in milk from the Southern Cities of Punjab, Pakistan: A health risk assessment study. *Journal of Food Composition and Analysis.* 2022;108:104446.
205. Ziarati P, Shirkhan F, Mostafidi M, Zahedi MT. An overview of the heavy metal contamination in milk and dairy products. *Acta scientific pharmaceutical sciences.* 2018;2(7):1-14.
206. Faye B, Seboussi R, Askar M, editors. Trace elements and heavy metals status in Arabian camel. *Impact of Pollution on Animal Products*; 2008 : Springer.
207. Patra R, Swarup D, Kumar P, Nandi D, Naresh R, Ali S. Milk trace elements in lactating cows environmentally exposed to higher level of lead and cadmium around different industrial units. *Science of the total environment.* 2008;404(1):36-43.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

208. Faye B, Bonnet P, editors. Camel sciences and economy in the world: current situation and perspectives. Proc 3rd ISOCARD conference Keynote presentations 29th January-1st February; 2012.
209. Zettner A. Principles and applications of atomic absorption spectroscopy. *Advances in clinical Chemistry*. 1964;7:1-62.
210. García R, Báez A. Atomic absorption spectrometry (AAS). *Atomic absorption spectroscopy*. 2012;1:1-13.
211. Karrari P, Mehrpour O, Abdollahi M. A systematic review on status of lead pollution and toxicity in Iran; Guidance for preventive measures. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2012;20:1-17.
212. Sharma H, Rawal N, Mathew BB. The characteristics, toxicity and effects of cadmium. *International journal of nanotechnology and nanoscience*. 2015;3(10).
213. European Food Safety Authority. Cadmium dietary exposure in the European population. *EFSA Journal*. 2012;10(1):2551.
214. European Food Safety Authority. Comparison of the Approaches Taken by EFSA and JECFA to Establish a HBGV for Cadmium. *EFSA Journal*. 2011;9(2):2006.
215. Steenland K, Boffetta P. Lead and cancer in humans: where are we now? *American journal of industrial medicine*. 2000;38(3):295-9.
216. Samiee F, Vahidinia A, Javad MT, Leili M. Exposure to heavy metals released to the environment through breastfeeding: A probabilistic risk estimation. *Science of the total environment*. 2019;650:3075-83.
217. Swarup D, Patra R, Naresh R, Kumar P, Shekhar P. Blood lead levels in lactating cows reared around polluted localities; transfer of lead into milk. *Science of the Total Environment*. 2005;347(1-3):106-10.
218. Norouzirad R, González-Montaña J-R, Martínez-Pastor F, Hosseini H, Shahrouzian A, Khabazkhoob M, et al. Lead and cadmium levels in raw bovine milk and dietary risk assessment in areas near petroleum extraction industries. *Science of the Total Environment*. 2018;635:308-14.
219. Zhang Y, Wang S, Gao Z, Zhang H, Zhu Z, Jiang B, et al. Contamination characteristics, source analysis and health risk assessment of heavy metals in the soil in Shi River Basin in China based on high density sampling. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;227:112926.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

220. Temiz H, Soylu A. Heavy metal concentrations in raw milk collected from different regions of Samsun, Turkey. *International journal of dairy technology*. 2012;65(4):516-22.
221. Pilarczyk R, Wójcik J, Czerniak P, Sablik P, Pilarczyk B, Tomza-Marciniak A. Concentrations of toxic heavy metals and trace elements in raw milk of Simmental and Holstein-Friesian cows from organic farm. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013;185(10):8383-92.
222. Ismail A, Riaz M, Akhtar S, Ismail T, Ahmad Z, Hashmi MS. Estimated daily intake and health risk of heavy metals by consumption of milk. *Food Additives & Contaminants: Part B*. 2015;8(4):260-5.
223. Klein CB, Costa M. Nickel. *Handbook on the Toxicology of Metals*: Elsevier; 2022. p. 615-37.
224. Abdelrahman MM, Alhidary IA, Aljumaah RS, Faye B. Blood trace element status in camels: A review. *Animals*. 2022;12(16):2116.
225. Feng W, He X, Chen M, Deng S, Qiu G, Li X, et al. Urinary metals and heart rate variability: a cross-sectional study of urban adults in Wuhan, China. *Environmental Health Perspectives*. 2015;123(3):217-22.
226. Guo L-C, Lv Z, Ma W, Xiao J, Lin H, He G, et al. Contribution of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> to cardiovascular disease mortality risk, a case study in Guangzhou, China. *Chemosphere*. 2022;297:134102.
227. Antwi SO, Eckert EC, Sabaque CV, Leof ER, Hawthorne KM, Bamlet WR, et al. Exposure to environmental chemicals and heavy metals, and risk of pancreatic cancer. *Cancer Causes & Control*. 2015;26:1583-91.
228. Panyakapo M, Soontornchai S, Paopuree P. Cancer risk assessment from exposure to trihalomethanes in tap water and swimming pool water. *Journal of environmental Sciences*. 2008;20(3):372-8.
229. Proshad R, Islam M, Kormoker T, Bhuyan M, Hanif M, Hossain N, et al. Contamination of heavy metals in agricultural soils: ecological and health risk assessment. *SF journal of nanochemistry and nanotechnology*. 2019;2(1).
230. Joint F, Additives WECof, Organization WH, editors. Summary of evaluations performed by the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA): 1956-1997 (first through forty-ninth meetings). Summary of evaluations performed by the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA): 1956-1997 (first through forty-ninth meetings); 1999.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

231. Organization Mondiale de la santé. Evaluation of certain contaminants in food. World Health Organization technical report series. 2011(959):1.
232. Standard International Dairy Federation. Metal contamination in milk and milk products. International Dairy Federation Bulletin Document no A Doe. 1979;37.
233. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural - statistiques de l'élevage camelin en Algérie, service des statistiques, bilan annuel 2019. Disponible en ligne sur : <https://madr.gov.dz/wp-content/uploads/2022/04/SERIE-B-2019.pdf>
234. Festing MF, Altman DG. Guidelines for the design and statistical analysis of experiments using laboratory animals. ILAR J. 2002;43:244–58.
235. Lenth RV. Some practical guidelines for effective sample size determination. Am Stat. 2001;55:187–93.
236. Jones SR, Carley S, Harrison M. An introduction to power and sample size estimation. Emerg Med J. 2003;20:453–8.
237. Office national de la météorologie. Rapport sur les données climatiques de Touggourt et Ouargla, 2018.
238. Medjber Teguib T, Hadj Benamane A, Khalfallah M. Etude de la variabilité climatique dans la région de Ouargla.
239. Boudehane A. Etude et caractérisations de la pollution atmosphérique de la région de Ouargla (Study and Characterizations of atmospheric pollution in Ouargla city) : University of Kasdi Merbah Ouargla.
240. Benhaddya ML, Hadjel M. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria. Environmental Earth Sciences. 2014;71:1473-86.
241. Pruvot C, Douay F, Hervé F, Waterlot C. Heavy metals in soil, crops and grass as a source of human exposure in the former mining areas (6 pp). Journal of soils and sediments. 2006;6:215-20.
242. Chehma A. Catalogue des plantes spontanées du Sahara septentrional algérien: Éditions universitaires européennes; 2006.
243. TOPwave Digestion theory. Analytik Jena Sale Tools. Microwave Pressure Digestion System. [Internet]. Disponible sur : <https://www.analytik-jena.fr/fr/instrumentation-analytique/produits/preparation-dechantillons.html>

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

244. Chaouali N, Nouioui A, Aouard M, Smaoui O, Amira D, Hedhili A. Mise au point et validation d'une méthode de dosage du plomb dans les matrices végétales par spectrométrie d'absorption atomique. *Toxicologie Analytique et Clinique*. 2018;30(1):35-42.
245. Rashed MN, Mohamed AE, Aboelhassn MM. Determination of heavy metals in preserving milk using microwave digestion and atomic absorption spectroscopy. *Aswan University Journal of Environmental Studies*. 2021;2(4):290-301.
246. Tafesse A, Lelago A. Determination of metals in fresh cow's milk under different feeding regime in Wolaita zone, southern Ethiopia. *Journal of Science and Inclusive Development*. 2022;4(2):73-89.
247. Ali HR, Ame MM, Sheikh MA, Bakari SS. Levels of lead (Pb), cadmium (Cd) and cobalt (Co) in cow milk from selected areas of Zanzibar Island, Tanzania. *American Journal of Analytical Chemistry*. 2023;14(7):287-304.
248. Softic A. Laboratory accreditation according to ISO 17025: 2005-Need or actual trend. TMT 2006, Barcelona-Lloret de Mar, Spain. 2006.
249. Hubert P, Nguyen-Huu J-J, Boulanger B, Chapuzet E, Chiap P, Cohen N, et al. Harmonization of strategies for the validation of quantitative analytical procedures: a SFSTP proposal—part I. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*. 2004;36(3):579-86.
250. Hubert P, Nguyen-Huu J-J, Boulanger B, Chapuzet E, Chiap P, Cohen N, et al. Harmonization of strategies for the validation of quantitative analytical procedures: a SFSTP proposal—part II. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*. 2007;45(1):70-81.
251. Hubert P, Nguyen-Huu J-J, Boulanger B, Chapuzet E, Cohen N, Compagnon P-A, et al. Harmonization of strategies for the validation of quantitative analytical procedures: A SFSTP proposal—Part III. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*. 2007;45(1):82-96.
252. Hubert P, Nguyen-Huu J-J, Boulanger B, Chapuzet E, Cohen N, Compagnon P-A, et al. Harmonization of strategies for the validation of quantitative analytical procedures: A SFSTP proposal: Part IV. Examples of application. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2008;48(3):760-71.
253. Barbieri M, Nigro A, Sappa G. Soil contamination evaluation by enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo). *Senses and Sciences*. 2015;2(3).
254. Barbieri M. The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *J Geol Geophys*. 2016;5(1):1-4.
255. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*. 1969;2:108-18.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

256. Mirecki N, Agic R, Sunic L, Milenkovic L, Ilic ZS. Transfer factor as indicator of heavy metals content in plants. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2015;24(11c):4212-9.
257. Laço A, Radulov I, Berbecea A, Laço K, Crista F. The transfer factor of metals in soil-plant system. *Research Journal of Agricultural Science*. 2012;44(3):67-72.
258. Miclean M, Cadar O, Levei EA, Roman R, Ozunu A, Levei L. Metal (Pb, Cu, Cd, and Zn) Transfer along Food Chain and Health Risk Assessment through Raw Milk Consumption from Free-Range Cows. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16(21):4064.
259. Kabata-Pendias A. Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*. 2004;122(2-4):143-9.
260. Leeman WR, Van Den Berg KJ, Houben GF. Transfer of chemicals from feed to animal products: The use of transfer factors in risk assessment. *Food additives and contaminants*. 2007;24(1):1-13.
261. Covello VT, Merkhoher MW. *Risk assessment methods: approaches for assessing health and environmental risks*: Springer Science & Business Media; 1993.
262. Christophoridis C, Kosma A, Evgenakis E, Bourliva A, Fytianos K. Determination of heavy metals and health risk assessment of cheese products consumed in Greece. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2019;82:103238.
263. XLSTAT X. *Data analysis and statistical solution for Microsoft Excel*. Addinsoft Paris, France. 2017.
264. Vidal NP, Manful CF, Pham TH, Stewart P, Keough D, Thomas R. The use of XLSTAT in conducting principal component analysis (PCA) when evaluating the relationships between sensory and quality attributes in grilled foods. *MethodsX*. 2020;7:100835.
265. Lara PCP. *Aplicação de métodos quimiométricos na análise direta de constituintes inorgânicos em leite materno por espectrometria de absorção atômica em forno de grafite*. 2008.
266. Kazi TG, Jalbani N, Baig JA, Kandhro GA, Afridi HI, Arain MB, et al. Assessment of toxic metals in raw and processed milk samples using electrothermal atomic absorption spectrophotometer. *Food and Chemical Toxicology*. 2009;47(9):2163-9.
267. Rahimi E. Lead and cadmium concentrations in goat, cow, sheep, and buffalo milks from different regions of Iran. *Food chemistry*. 2013;136(2):389-91.
268. Bilandžić N, Đokić M, Sedak M, Solomun B, Varenina I, Knežević Z, et al. Trace element levels in raw milk from northern and southern regions of Croatia. *Food chemistry*. 2011;127(1):63-6.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

269. Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental pollution*. 2001;114(3):313-24.
270. Han FX, Patterson WD, Xia Y, Sridhar BM, Su Y. Rapid determination of mercury in plant and soil samples using inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, a comparative study. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2006;170:161-71.
271. Zhang X-Y, Yue-Yu S, Zhang X-D, Kai M, Herbert S. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. *Pedosphere*. 2007;17(1):19-29.
272. Gzyl J. Lead and cadmium contamination of soil and vegetables in the Upper Silesia region of Poland. *Science of the total environment*. 1990;96(1-2):199-209.
273. Zheng N, Wang Q, Zhang X, Zheng D, Zhang Z, Zhang S. Population health risk due to dietary intake of heavy metals in the industrial area of Huludao city, China. *Science of the Total Environment*. 2007;387(1-3):96-104.
274. Venetsanos A, Vlachogiannis D, Papadopoulos A, Bartzis J, Andronopoulos S. Studies on pollutant dispersion from moving vehicles. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*. 2002;2:325-37.
275. Arslan H, Gizir AM. Heavy-metal content of roadside soil in Mersin, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2006;15(1):15-20.
276. Sellami S, Zeghouan O, Lassaad M, Moussaoui Y, Kebabi B. Determination of lead concentrations in the soils of Setif City, Eastern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020;13:1-9.
277. Triantafyllidou S, Edwards M. Lead (Pb) in tap water and in blood: implications for lead exposure in the United States. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2012;42(13):1297-352.
278. Benhaddya ML, Boukhelkhal A, Halis Y, Hadjel M. Human health risks associated with metals from urban soil and road dust in an oilfield area of Southeastern Algeria. *Archives of environmental contamination and toxicology*. 2016;70:556-71.
279. Imperato M, Adamo P, Naimo D, Arienzo M, Stanzione D, Violante P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental pollution*. 2003;124(2):247-56.
280. Kim K-W, Myung J-H, Ahn J, Chon H-T. Heavy metal contamination in dusts and stream sediments in the Taejon area, Korea. *Journal of Geochemical Exploration*. 1998;64(1-3):409-19.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

281. De Miguel E, De Grado MJ, Llamas J, Martín-Dorado A, Mazadiego L. The overlooked contribution of compost application to the trace element load in the urban soil of Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*. 1998;215(1-2):113-22.
282. Hunt A, Johnson D, Thornton I. Descriptive apportionment of lead in housedust by automated SEM. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1991;57:69-77.
283. Morton-Bermea O, Hernández-Álvarez E, González-Hernández G, Romero F, Lozano R, Beramendi-Orosco L. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City. *Journal of Geochemical Exploration*. 2009;101(3):218-24.
284. Romic M, Romic D. Heavy metals distribution in agricultural topsoils in urban area. *Environmental geology*. 2003;43:795-805.
285. Krika A, Rached O, Du Laing G. Assessment of atmospheric lead contamination of banks soils using soils tamarisk grove. Case study of the Kebir Rhumel (Algeria). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2013;8(1):207-16.
286. Wilcke W, Müller S, Kanchanakool N, Zech W. Urban soil contamination in Bangkok: heavy metal and aluminium partitioning in topsoils. *Geoderma*. 1998;86(3-4):211-28.
287. Li J-S, Xue Q, Wang P, Li Z-Z, Liu L. Effect of drying-wetting cycles on leaching behavior of cement solidified lead-contaminated soil. *Chemosphere*. 2014;117:10-3.
288. Frank JJ, Poulakos AG, Tornero-Velez R, Xue J. Systematic review and meta-analyses of lead (Pb) concentrations in environmental media (soil, dust, water, food, and air) reported in the United States from 1996 to 2016. *Science of the Total Environment*. 2019;694:133489.
289. Chow TJ. Lead accumulation in roadside soil and grass. *Nature*. 1970;225:295-6.
290. Chandrasekhar C, Ray JG. Lead accumulation, growth responses and biochemical changes of three plant species exposed to soil amended with different concentrations of lead nitrate. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;171:26-36.
291. Al-Khashman OA. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. *Atmospheric environment*. 2004;38(39):6803-12.
292. Rotkittikhun P, Chaiyarat R, Kruatrachue M, Pokethitiyook P, Baker A. Growth and lead accumulation by the grasses *Vetiveria zizanioides* and *Thysanolaena maxima* in lead-contaminated soil amended with pig manure and fertilizer: a glasshouse study. *Chemosphere*. 2007;66(1):45-53.
293. Peijnenburg WJ, Zablotskaja M, Vijver MG. Monitoring metals in terrestrial environments within a bioavailability framework and a focus on soil extraction. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2007;67(2):163-79.





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

294. Hargreaves AL, Whiteside DP, Gilchrist G. Concentrations of 17 elements, including mercury, in the tissues, food and abiotic environment of Arctic shorebirds. *Science of the Total Environment*. 2011;409(19):3757-70.
295. Bouarfa S, Slimani K, Mokhtari M, Ambar A, Sabri AF. Étude statistique de l'occurrence des vents de sable dans le sud algérien et de leur impact sur les températures: Étude de cas par le modèle AROME. *JAMA*. 2018;2:19-23.
296. Yang P, Drohan PJ, Yang M. Patterns in soil contamination across an abandoned steel and iron plant: Proximity to source and seasonal wind direction as drivers. *Catena*. 2020;190:104537.
297. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants: CRC press; 2000.
298. Wang L, Cui X, Cheng H, Chen F, Wang J, Zhao X, et al. A review of soil cadmium contamination in China including a health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015;22:16441-52.
299. Shikhova LN, Lisitsyn EM. Effect of cadmium and lead on leaf photosynthetic apparatus of cereal crops. *Journal of nature science and Sustainable Technology*. 2016;10(2):185.
300. Mahmood Q, Asif M, Shaheen S, Hayat MT, Ali S. Cadmium contamination in water and soil. *Cadmium toxicity and tolerance in plants: Elsevier*; 2019. p. 141-61.
301. Maas S, Scheifler R, Benslama M, Crini N, Lucot E, Brahmia Z, et al. Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. *Environmental pollution*. 2010;158(6):2294-301.
302. Malik RN, Husain SZ, Nazir I. Heavy metal contamination and accumulation in soil and wild plant species from industrial area of Islamabad, Pakistan. *Pak J Bot*. 2010;42(1):291-301.
303. Sun Y, Li Y, Xu Y, Liang X, Wang L. In situ stabilization remediation of cadmium (Cd) and lead (Pb) co-contaminated paddy soil using bentonite. *Applied Clay Science*. 2015;105:200-6.
304. Yaylalı-Abanuz G. Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey. *Microchemical Journal*. 2011;99(1):82-92.
305. De Temmerman L, Vanongeval L, Boon W, Hoenig M, Geypens M. Heavy metal content of arable soils in northern Belgium. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2003;148:61-76.
306. Healy W, editor Ingested soil and animal nutrition. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*; 1972.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

307. Dudka S, Piotrowska M, Terelak H. Transfer of cadmium, lead, and zinc from industrially contaminated soil to crop plants: a field study. *Environmental Pollution*. 1996;94(2):181-8.
308. Legret M, Pagotto C. Heavy metal deposition and soil pollution along two major rural highways. *Environmental Technology*. 2006;27(3):247-54.
309. Liu R, Wang M, Chen W, Peng C. Spatial pattern of heavy metals accumulation risk in urban soils of Beijing and its influencing factors. *Environmental Pollution*. 2016;210:174-81.
310. Lee B-K, Hieu NT. Seasonal variation and sources of heavy metals in atmospheric aerosols in a residential area of Ulsan, Korea. *Aerosol and Air Quality Research*. 2011;11(6):679-88.
311. Tian S, Liang T, Li K. Fine road dust contamination in a mining area presents a likely air pollution hotspot and threat to human health. *Environment international*. 2019;128:201-9.
312. Punia A. Role of temperature, wind, and precipitation in heavy metal contamination at copper mines: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(4):4056-72.
313. Zhang K, Chai F, Zheng Z, Yang Q, Zhong X, Fomba KW, et al. Size distribution and source of heavy metals in particulate matter on the lead and zinc smelting affected area. *Journal of Environmental Sciences*. 2018;71:188-96.
314. Young SD. Chemistry of heavy metals and metalloids in soils. *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. 2013:51-95.
315. Mirsal IA, Mirsal IA. Sources of soil pollution. *Soil Pollution: Origin, Monitoring & Remediation*. 2008:137-73.
316. Diacono E. Métaux lourds et radionucléides dans le lait de chamelle frais et fermenté, au Kazakhstan. 2007.
317. Parkpian P, Leong ST, Laortanakul P, Thunthaisong N. Regional monitoring of lead and cadmium contamination in a tropical grazing land site, Thailand. *Environmental monitoring and assessment*. 2003;85:157-73.
318. Khan S, Khan M, Rehman S. Lead and cadmium contamination of different roadside soils and plants in Peshawar City, Pakistan. *Pedosphere*. 2011;21(3):351-7.
319. Alshahri F, El-Taher A. Assessment of heavy and trace metals in surface soil nearby an oil refinery, Saudi Arabia, using geoaccumulation and pollution indices. *Archives of environmental contamination and toxicology*. 2018;75:390-401.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

320. Chehregani Rad A, Malayeri BE, Mohsenzadeh F, Shirkhani Z. Screening for plants and rhizospheral fungi with bioremediation potency of petroleum-polluted soils in a Tehran oil refinery area. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2014;96(1):84-93.
321. Essoka P, Ubogu A, Uzu L. An overview of oil pollution and heavy metal concentration in Warri area, Nigeria. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. 2006.
322. Onianwa P, Jaiyeola O, Egekenze R. Heavy metals contamination of topsoil in the vicinities of auto-repair workshops, gas stations and motor-parks in a Nigerian city. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2003;84(1-4):33-9.
323. Faye B. Camel farming sustainability: the challenges of the camel farming system in the XXIth century. 2013.
324. Schmidt-Nielsen B, Schmidt-Nielsen K, Houpt Tt, Jarnum S. Water balance of the camel. *American Journal of Physiology-Legacy Content*. 1956;185(1):185-94.
325. Payne M. Lead in drinking water. *Cmaj*. 2008;179(3):253-4.
326. Burger J. Assessment and management of risk to wildlife from cadmium. *Science of the total environment*. 2008;389(1):37-45.
327. Asli M, Azizzadeh M, Moghaddamjafari A, Mohsenzadeh M. Copper, iron, manganese, zinc, cobalt, arsenic, cadmium, chrome, and lead concentrations in liver and muscle in Iranian camel (*Camelus dromedarius*). *Biological trace element research*. 2020;194:390-400.
328. Journal officiel de la république Algérienne. Paramètres de Qualité de l'Eau de Consommation Humaine. JORA n°18 du 23 mars 2011. 2011.
329. Organisation mondiale de la Santé (OMS). Directives de qualité pour l'eau de boisson: 4e éd. intégrant le premier additif. 2017.
330. Payne M. Lead in drinking water. *Cmaj*. 2008;179(3):253-4.
331. Assubaie FN. Assessment of the levels of some heavy metals in water in Alahsa Oasis farms, Saudi Arabia, with analysis by atomic absorption spectrophotometry. *Arabian Journal of Chemistry*. 2015;8(2):240-5.
332. Hashem A. Heavy metals analysis of water and soils from Saudi Arabia. *J King Saud Univ*. 1993;5(1):39-45.
333. Momodu M, Anyakora C. Heavy metal contamination of ground water: The Surulere case study. *Res J Environ Earth Sci*. 2010;2(1):39-43.
334. Gowd S, Govil PK. Distribution of heavy metals in surface water of Ranipet industrial area in Tamil Nadu, India. *Environmental monitoring and assessment*. 2008;136:197-207.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

335. Chowdhury S, Mazumder MJ, Al-Attas O, Husain T. Heavy metals in drinking water: occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Science of the total Environment*. 2016;569:476-88.
336. Zhao X-M, Yao L-A, Ma Q-L, Zhou G-J, Wang L, Fang Q-L, et al. Distribution and ecological risk assessment of cadmium in water and sediment in Longjiang River, China: Implication on water quality management after pollution accident. *Chemosphere*. 2018;194:107-16.
337. Union Européenne. Directive du conseil 98/83/EC sur la qualité de l'eau attendue pour la consommation humaine. Directive adoptée le. 1998;3.
338. Gallup DL. Removal of mercury from water in the petroleum industry. 21st annual international petroleum environmental conference, Houston, TX. 2014.
339. Lothongkum AW, Suren S, Chaturabul S, Thamphiphit N, Pancharoen U. Simultaneous removal of arsenic and mercury from natural-gas-co-produced water from the Gulf of Thailand using synergistic extractant via HFSLM. *Journal of membrane science*. 2011;369(1-2):350-8.
340. Zettlitzer M, Scholer H, Eiden R, Falter R, editors. Determination of elemental, inorganic and organic mercury in north German gas condensates and formation brines. *International Symposium on Oilfield Chemistry; 1997 : OnePetro*.
341. Kho F, Koppel DJ, von Hellfeld R, Hastings A, Gissi F, Cresswell T, et al. Current understanding of the ecological risk of mercury from subsea oil and gas infrastructure to marine ecosystems. *Journal of Hazardous Materials*. 2022:129348.
342. Kho F, Koppel DJ, von Hellfeld R, Hastings A, Gissi F, Cresswell T, et al. Current understanding of the ecological risk of mercury from subsea oil and gas infrastructure to marine ecosystems. *Journal of Hazardous Materials*. 2022:129348.
343. Organisation Mondiale de la Santé. Quality control methods for medicinal plant material. 1998.
344. Caggiano R, Sabia S, D'Emilio M, Macchiato M, Anastasio A, Ragosta M, et al. Metal levels in fodder, milk, dairy products, and tissues sampled in ovine farms of Southern Italy. *Environmental research*. 2005;99(1):48-57.
345. Rashed M. Determination of trace elements in milk of some animals from Aswan (Egypt). *International journal of environmental analytical chemistry*. 1992;48(1):41-50.
346. Singh N, Pandey V, Misra J, Yunus M, Ahmad K. Atmospheric lead pollution from vehicular emissions—measurements in plants, soil and milk samples. *Environmental Monitoring and Assessment*. 1997;45:9-19.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

347. Kumar A, Prasad MNV. Plant-lead interactions: transport, toxicity, tolerance, and detoxification mechanisms. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018;166:401-18.
348. Luilo G, Othman OC, editors. Heavy metal levels of pasture grasses in metropolitan area. *Journal de Physique IV (Proceedings)*; 2003 : EDP sciences.
349. Benavides MP, Gallego SM, Tomaro ML. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian journal of plant physiology*. 2005;17:21-34.
350. Andresen E, Küpper H. Cadmium toxicity in plants. *Cadmium: from toxicity to essentiality*. 2013:395-413.
351. Hasan Aiman S, Fariduddin Q, Ali B, Hayat S, Ahmad A. Cadmium: toxicity and tolerance in plants. *J Environ Biol*. 2009;30(2):165-74.
352. Kebir T, Bouhadjera K. Effects of heavy metals pollution in soil and plant in the industrial area, West Algeria. *Journal of the Korean chemical society*. 2011;55(6):1018-23.
353. Vromman V, Saegerman C, Pussemier L, Huyghebaert A, Temmerman LD, Pizzolon J-C, et al. Cadmium in the food chain near non-ferrous metal production sites. *Food additives and contaminants*. 2008;25(3):293-301.
354. Swarup D, Naresh R, Varshney V, Balagangatharathilagar M, Kumar P, Nandi D, et al. Changes in plasma hormones profile and liver function in cows naturally exposed to lead and cadmium around different industrial areas. *Research in veterinary science*. 2007;82(1):16-21.
355. Pugh RE, Dick DG, Fredeen AL. Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe, and Cu) contents of plant foliage near the Anvil Range lead/zinc mine, Faro, Yukon Territory. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2002;52(3):273-9.
356. Li J, Qiu J, Wang X, Zhong Y, Lan C, Shu W. Cadmium contamination in orchard soils and fruit trees and its potential health risk in Guangzhou, China. *Environmental Pollution*. 2006;143(1):159-65.
357. Włostowski T, Kozłowski P, Łaskiewicz-Tiszczenko B, Oleńska E. Cadmium accumulation and pathological alterations in the midgut gland of terrestrial snail *Helix pomatia* L. from a zinc smelter area: role of soil pH. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2016;96:484-9.
358. Alonso ML, Montaña FP, Miranda M, Castillo C, Hernández J, Benedito JL. Interactions between toxic (As, Cd, Hg and Pb) and nutritional essential (Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) elements in the tissues of cattle from NW Spain. *Biometals*. 2004;17:389-97.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

359. Brekken A, Steinnes E. Seasonal concentrations of cadmium and zinc in native pasture plants: consequences for grazing animals. *Science of the Total Environment*. 2004;326(1-3):181-95.
360. Khan ZI, Ahmad K, Bayat A, Mukhtar MK, Sher M. Evaluation of lead concentration in pasture and milk: A possible risk for livestock and public health. *Pakistan Journal of Zoology*. 2013;45(1).
361. Gjengedal E. Effects of soil acidification on foliar leaching and retranslocation of metals in vascular plants. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1996;86:221-34.
362. Matthews H, Thornton I. Seasonal and species variation in the content of cadmium and associated metals in pasture plants at Shipham. *Plant and soil*. 1982;66:181-93.
363. Kim ND, Fergusson JE. Seasonal variations in the concentrations of cadmium, copper, lead and zinc in leaves of the horse chesnut (*Aesculus hippocastanum* L.). *Environmental Pollution*. 1994;86(1):89-97.
364. Ahmad K, Ejaz A, Azam M, Khan ZI, Ashraf M, Al-Qurainy F, et al. Lead, cadmium and chromium contents of canola irrigated with sewage water. *Pak J Bot*. 2011;43(2):1403-10.
365. Ndiokwere CL. A study of heavy metal pollution from motor vehicle emissions and its effect on roadside soil, vegetation and crops in Nigeria. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*. 1984;7(1):35-42.
366. Farmer AA, Farmer AM. Concentrations of cadmium, lead and zinc in livestock feed and organs around a metal production centre in eastern Kazakhstan. *Science of the Total Environment*. 2000;257(1):53-60.
367. Gish CD, Christensen RE. Cadmium, nickel, lead, and zinc in earthworms from roadside soil. *Environmental science & technology*. 1973;7(11):1060-2.
368. Raj D. Bioaccumulation of mercury, arsenic, cadmium, and lead in plants grown on coal mine soil. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2019;25(3):659-71.
369. Flaten TP, Steinnes E. Soil and fresh waters. Ballantyne B. 1999.
370. Tanhan P, Kruatrachue M, Pokethitiyook P, Chaiyarat R. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed [*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson]. *Chemosphere*. 2007;68(2):323-9.
371. Pilguk O. Ecological assessment of the state of cadmium in the soil-plant system under the conditions of the Semipalatinsk Irtysh. *Semipalatinsk, -2005-22 p*. 2005.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

372. Baye H, Hymete A. Lead and cadmium accumulation in medicinal plants collected from environmentally different sites. *Bulletin of environmental Contamination and toxicology*. 2010;84:197-201.
373. Elamin F, Wilcox C. Milk composition of Majaheim camels. *Journal of dairy science*. 1992;75(11):3155-7.
374. Domingo JL. Concentrations of toxic elements (As, Cd, Hg and Pb) in cow milk: A review of the recent scientific literature. *International Journal of Dairy Technology*. 2021;74(2):277-85.
375. Bilandžić N, Sedak M, Čalopek B, Luburić ĐB, Solomun Kolanović B, Varenina I, et al. Lead concentrations in raw cow and goat milk collected in rural areas of Croatia from 2010 to 2014. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 2016;96:645-9.
376. González-Montaña JR, Senís E, Gutiérrez A, Prieto F. Cadmium and lead in bovine milk in the mining area of the Caudal River (Spain). *Environmental monitoring and assessment*. 2012;184:4029-34.
377. Zwierzchowski G, Ametaj BN. Mineral elements in the raw milk of several dairy farms in the province of Alberta. *Foods*. 2019;8(8):345.
378. Najarnejhad V, Akbarabadi M. Heavy metals in raw cow and ewe milk from north-east Iran. *Food Additives & Contaminants: Part B*. 2013;6(3):158-62.
379. Shailaja M, Reddy YS, Kalakumar B, Brinda S, Manohar G, Kumar BD. Lead and trace element levels in milk and blood of buffaloes (*Bubalus bubalis*) from Hyderabad, India. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 2014;92:698-702.
380. Dey S, Dwivedi S, Swarup D. Lead concentration in blood, milk and feed of lactating buffalo after acute lead poisoning. *The Veterinary Record*. 1996;138(14):336.
381. Zhou X, Qu X, Zhao S, Wang J, Li S, Zheng N. Analysis of 22 elements in milk, feed, and water of dairy cow, goat, and buffalo from different regions of China. *Biological trace element research*. 2017;176:120-9.
382. Kaptan B, Bilgücü E, Palabiyik I, Öksüz Ö. The effect of environmental factors on heavy metal and mineral compositions of raw milk and water samples. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*. 2016;13(4).
383. Ogundiran M, Ogundele D, Afolayan P, Osibanjo O. Heavy metals levels in forage grasses, leachate and lactating cows reared around lead slag dumpsites in Nigeria. *International Journal of Environmental Research*. 2012;6(3):695-702.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

384. Derakhshesh SM, Rahimi E, Derakhshesh S. Determination of lead residue in raw cow milk from different regions of Iran by Flameless Atomic Absorption Spectrometry. *Am-Eur J Toxicol Sci.* 2012;4(1):16-9.
385. Raghu V. Study of dung, urine, and milk of selected grazing animals as bioindicators in environmental geoscience—a case study from Mangampeta barite mining area, Kadapa District, Andhra Pradesh, India. *Environmental monitoring and assessment.* 2015;187:1-10.
386. Aslam B, Javed I, Khan FH. Uptake of Heavy Metal Residues from Sewerage Sludge in the Milk of Goat and Cattle during Summer Season. *Pakistan veterinary journal.* 2011;31(1).
387. Nnadozie C, Birnin-Yauri U, Muhammad C, Umar A. Assessment of some diary products sold in Sokoto Metropolis, Nigeria. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science.* 2014;1(10):1-7.
388. Elhardallou SB, El-Naggar AY. Determination of micro minerals in milk from farm and pasture-reared cow, goat and camel; using inductively coupled plasma-optical emission spectrometry. *Orient J Chem.* 2016;32(1):341-7.
389. Kaptan B, Bilgücü E, Palabiyik I, Öksüz Ö. The effect of environmental factors on heavy metal and mineral compositions of raw milk and water samples. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi.* 2016;13(4).
390. Elatrash S, Atoweir N. Determination of lead and cadmium in raw cow's milk by graphite furnace atomic absorption spectroscopy. *Int J Chem Sci.* 2014;12(1):92-100.
391. Zhou X, Qu X, Zheng N, Su C, Wang J, Soyeyurt H. Large scale study of the within and between spatial variability of lead, arsenic, and cadmium contamination of cow milk in China. *Science of the Total Environment.* 2019;650:3054-61.
392. Food and Nutrition Board, 2001. Dietary Reference Intakes (DRIs) Recommended Intakes for Individual Elements. Food and Nutrition Board. Available from. [https://ods.od.nih.gov/Health\\_Information/Dietary\\_Reference\\_Intakes.aspx](https://ods.od.nih.gov/Health_Information/Dietary_Reference_Intakes.aspx). Consulté le : 25 mai 2023.
393. Ismail A, Riaz M, Akhtar S, Goodwill JE, Sun J. Heavy metals in milk: global prevalence and health risk assessment. *Toxin Reviews.* 2019;38(1):1-12.
394. Giri S, Singh AK. Human health risk assessment due to metals in cow's milk from Singhbhum copper and iron mining areas, India. *Journal of food science and technology.* 2020;57(4):1415-20.
395. Iftikhar B, Arif S, Siddiqui S, Khattak R. Assessment of Toxic Metals in Dairy Milk and Animal Feed in Peshawar, Pakistan. *Br Biotechnol J.* 2014.





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

396. Kabir A, Khan K, Khan I, Jubair T, Jhahan E. A study of heavy metal presence in cow milk of different dairy farms near Karnafuli paper mills, Chittagong, Bangladesh. *Am J Eng Res.* 2017;6(9):329-386.
397. Phillips C, Györi Z, Kovács B. The effect of adding cadmium and lead alone or in combination to the diet of pigs on their growth, carcass composition and reproduction. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 2003;83(13):1357-65.
398. Pilarczyk R, Wójcik J, Czerniak P, Sablik P, Pilarczyk B, Tomza-Marciniak A. Concentrations of toxic heavy metals and trace elements in raw milk of Simmental and Holstein-Friesian cows from organic farm. *Environmental monitoring and assessment.* 2013;185:8383-92.
399. Pavlovic I, Sikiric M, Havranek J, Plavljanic N, Brajenovic N. Lead and cadmium levels in raw cow's milk from an industrialised Croatian region determined by electrothermal atomic absorption spectrometry. *Czech journal of animal science.* 2004;49(4):164-8.
400. Thornton I, Farago M. The geochemistry of arsenic. *Arsenic: exposure and health effects.* 1997:1-16.
401. Nas FS, Ali M. The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review. *MOJ Ecol Environ Sci.* 2018;3(4):265-8.
402. Pourrut B, Shahid M, Dumat C, Winterton P, Pinelli E. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants. *Reviews of environmental contamination and toxicology volume 213.* 2011:113-36.
403. Zhou H, Yang W-T, Zhou X, Liu L, Gu J-F, Wang W-L, et al. Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment. *International journal of environmental research and public health.* 2016;13(3):289.
404. Dudka S, Miller W. Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfer to human food chain. *Journal of Environmental Science & Health Part B.* 1999;34(4):681-708.
405. Lu L-l, Tian S-k, Yang X-e, Li T-q, He Z-l. Cadmium uptake and xylem loading are active processes in the hyperaccumulator *Sedum alfredii*. *Journal of Plant Physiology.* 2009;166(6):579-87.
406. Kloke A, Sauerbeck D, Vetter H, editors. The contamination of plants and soils with heavy metals and the transport of metals in terrestrial food chains. *Changing Metal Cycles and Human Health: Report of the Dahlem Workshop on Changing Metal Cycles and Human Health, Berlin 1983, March 20–25; 1984 : Springer.*



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

407. Yan X, Zhang F, Zeng C, Zhang M, Devkota LP, Yao T. Relationship between heavy metal concentrations in soils and grasses of roadside farmland in Nepal. *International journal of environmental research and public health*. 2012;9(9):3209-26.
408. Chehma A, Faye B, Djebbar MR. Productivité fourragère et capacité de charge des parcours camélins du Sahara septentrional algérien. *Science et changements planétaires/Sécheresse*. 2008;19(2):115-21.
409. Makridis C, Svarnas C, Rigas N, Gougoulas N, Roka L, Leontopoulos S. Transfer of heavy metal contaminants from animal feed to animal products. *Journal of Agricultural Science and Technology A*. 2012;2(1A):149.
410. Tunegová M, Toman R, Tančin V. Heavy metals-environmental contaminants and their occurrence in different types of milk. *Slovak Journal of Animal Science*. 2016;49(3):122-31.
411. Ohno K, Yanase T, Matsuo Y, Kimura T, Rahman MH, Magara Y, et al. Arsenic intake via water and food by a population living in an arsenic-affected area of Bangladesh. *Science of the Total Environment*. 2007;381(1-3):68-76.
412. Harmanescu M, Alda LM, Bordean DM, Gogoasa I, Gergen I. Heavy metals health risk assessment for population via consumption of vegetables grown in old mining area; a case study: Banat County, Romania. *Chemistry Central Journal*. 2011;5:1-10.
413. Bilandžić N, Đokić M, Sedak M, Solomun B, Varenina I, Knežević Z, et al. Trace element levels in raw milk from northern and southern regions of Croatia. *Food chemistry*. 2011;127(1):63-6.
414. Cadar O, Tănăselia C, Miclean M, Levei E. Analysis of minor and trace elements in cow, goat and sheep milk in the NW part of Romania. *ProEnvironment Promediu*. 2016;9(26).
415. González-Weller D, Karlsson L, Caballero A, Hernández F, Gutiérrez A, González-Iglesias T, et al. Lead and cadmium in meat and meat products consumed by the population in Tenerife Island, Spain. *Food additives and Contaminants*. 2006;23(8):757-63.
416. Barry PS. Concentrations of lead in the tissues of children. *Occupational and Environmental Medicine*. 1981;38(1):61-71.
417. Kasozi KI, Natabo PC, Namubiru S, Tayebwa DS, Tamale A, Bamaiyi PH. Food safety analysis of milk and beef in southwestern Uganda. *Journal of environmental and public health*. 2018.

Annexes

## **LISTE DES ANNEXES**

**Annexe 1 : Coordonnées GPS des élevages sélectionnés dans l'étude.**

**Annexe 2 : Cartographie de chaque Elevage.**

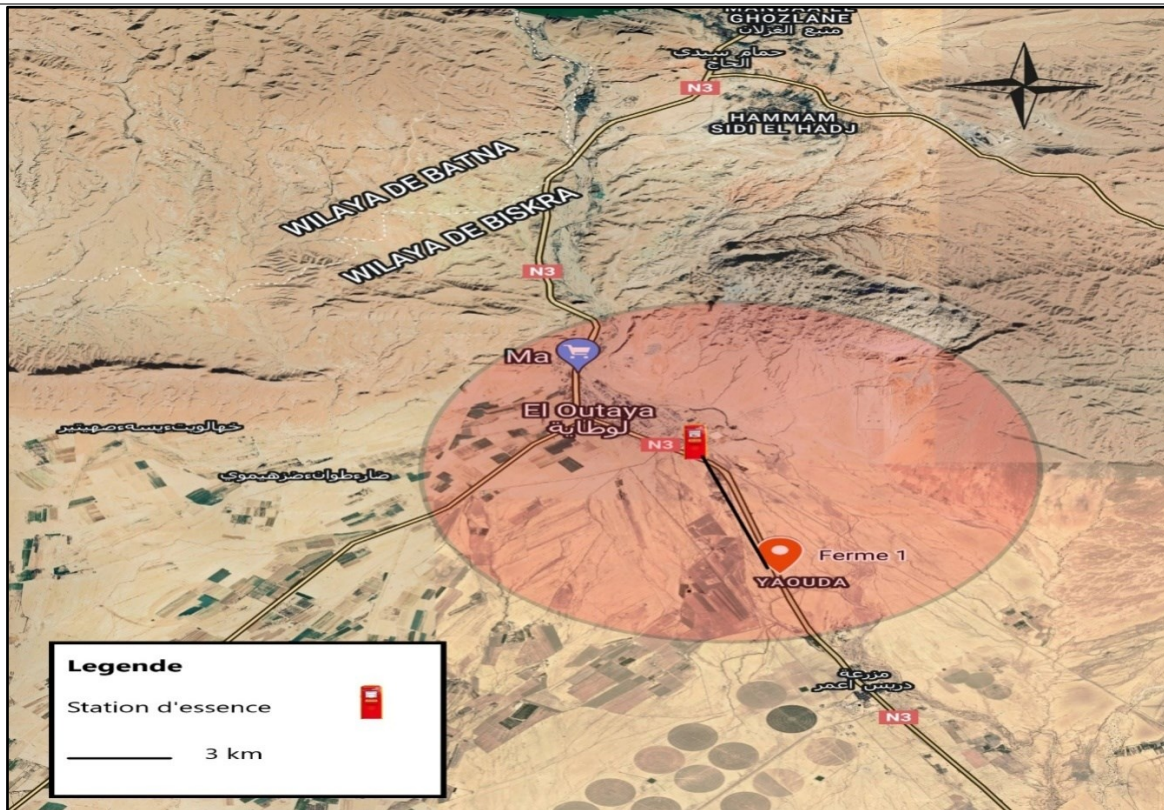
**Annexe 3. Résultats bruts des analyses des métaux selon la matrice, la zone de collecte et la saison.**

**Annexe 1 : Coordonnées GPS des élevages sélectionnés dans l'étude.**

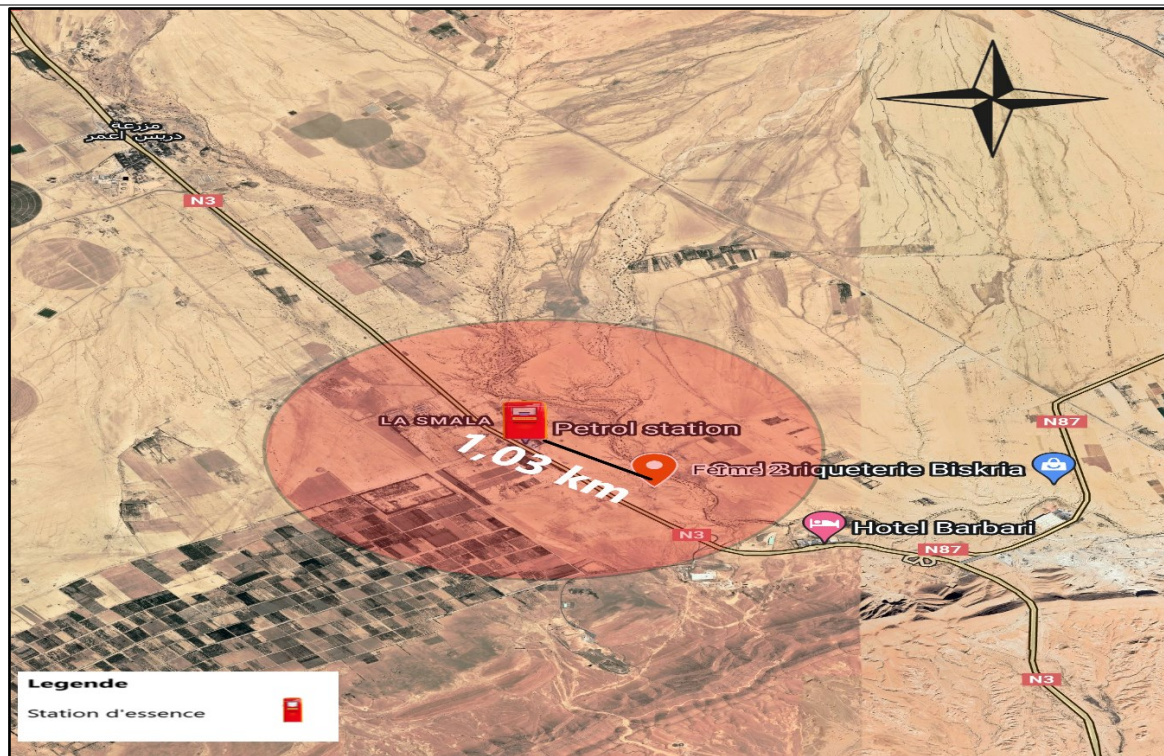
**Tableau. Coordonnées GPS des élevages de l'étude.**

<b>Zone de collecte</b>	<b>Site de collecte</b>	<b>Coordonnées GPS</b>	<b>Date de collecte</b>
<b>Biskra</b>	<b>Elevage 1</b>	34°59'50,6"N 5°36'58,2"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021
	<b>Elevage 2</b>	34°55'46,5"N 5°40'08,1"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021
<b>Oued Souf</b>	<b>Elevage 3</b>	34°23'18,1"N 5°54'07,7"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021
	<b>Elevage 4</b>	34°16'47,8"N 5°55'04,1"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021
<b>Touggourt</b>	<b>Elevage 5</b>	34°10'07,5"N 5°48'03,8"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021
	<b>Elevage 6</b>	33°17'07,3"N 6°01'45,1"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021
<b>Ouargla</b>	<b>Elevage 7</b>	32°55'56,8"N 5°55'37,3"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021
	<b>Elevage 8</b>	31°56'10,6"N 5°56'39,7"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021
<b>Ghardaïa</b>	<b>Elevage 9</b>	31°54'09,2"N 5°21'03,7"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021
	<b>Elevage 10</b>	32°20'13,2"N 3°48'55,4"E	Janvier, Mars, Juin et Septembre 2021

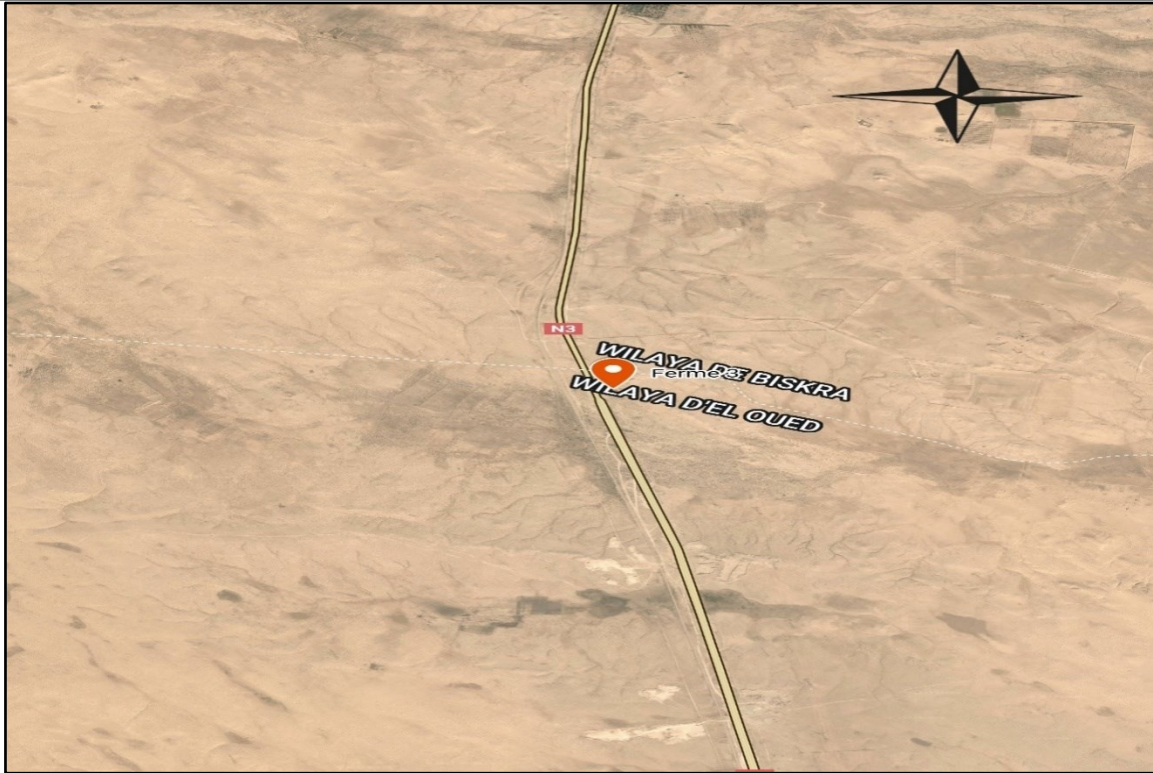
## Annexe 2 : Cartographie de chaque Elevage



Elevage 1



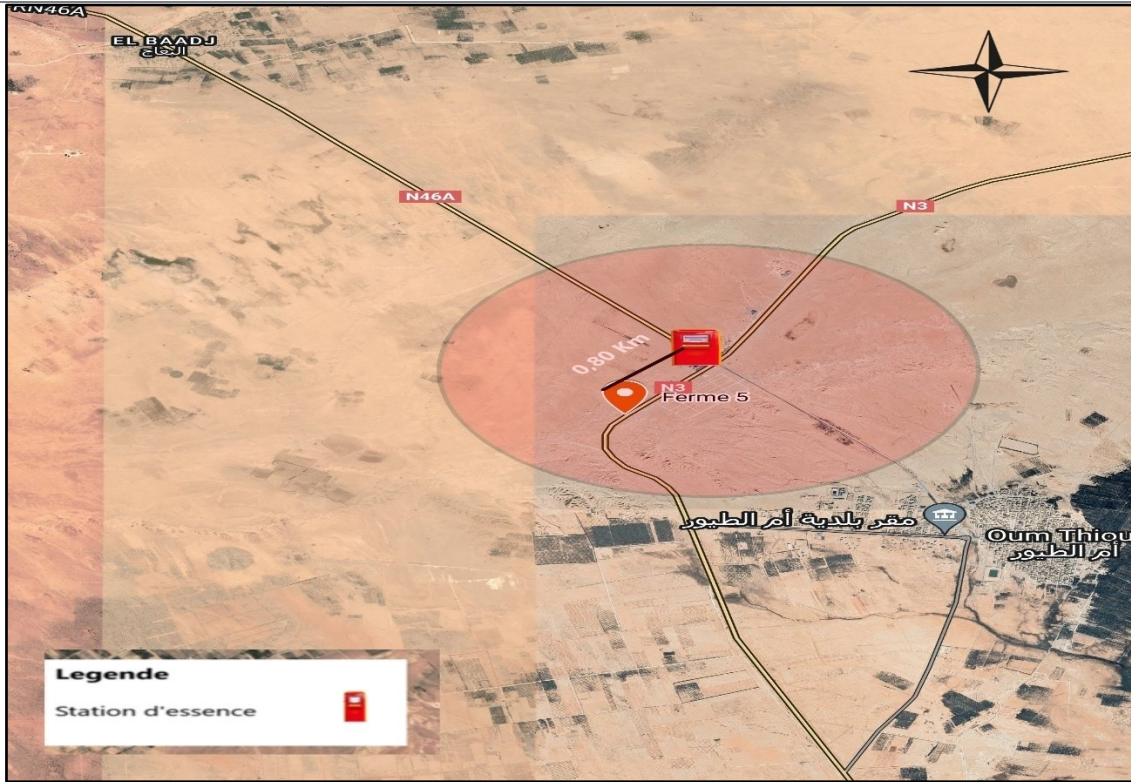
Elevage 2



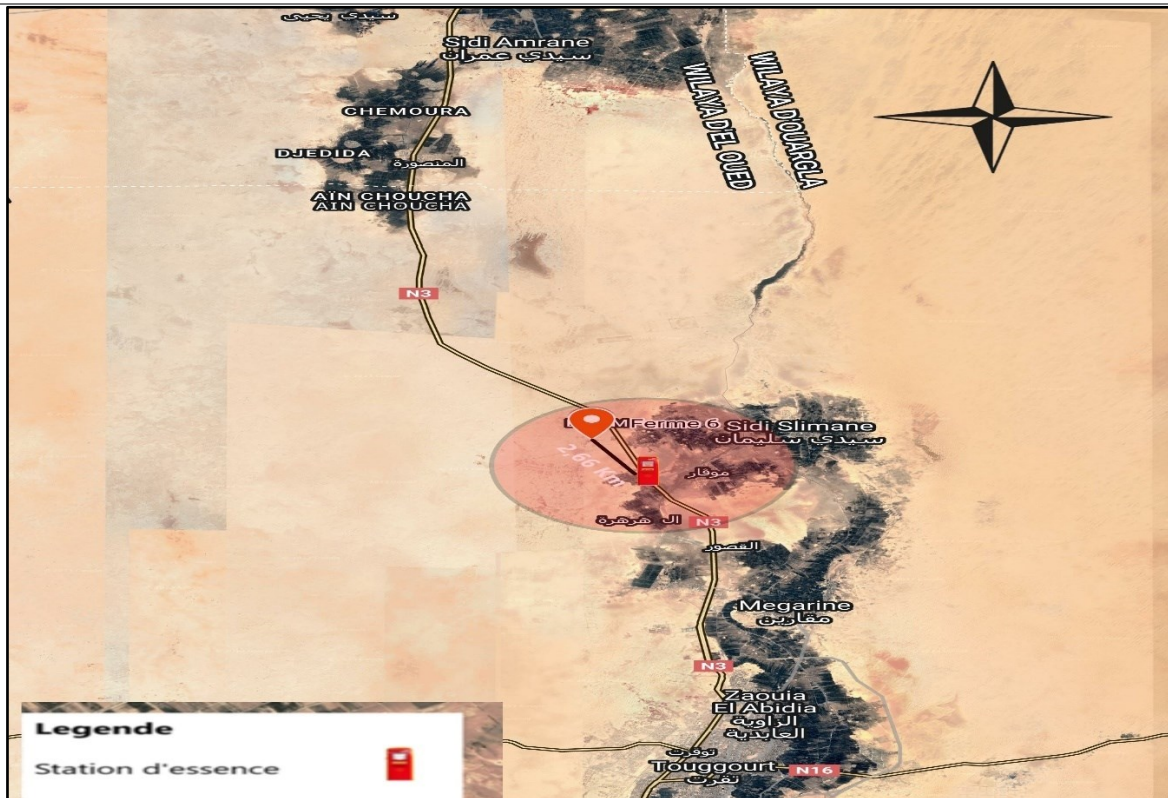
Elevage 3



Elevage 4

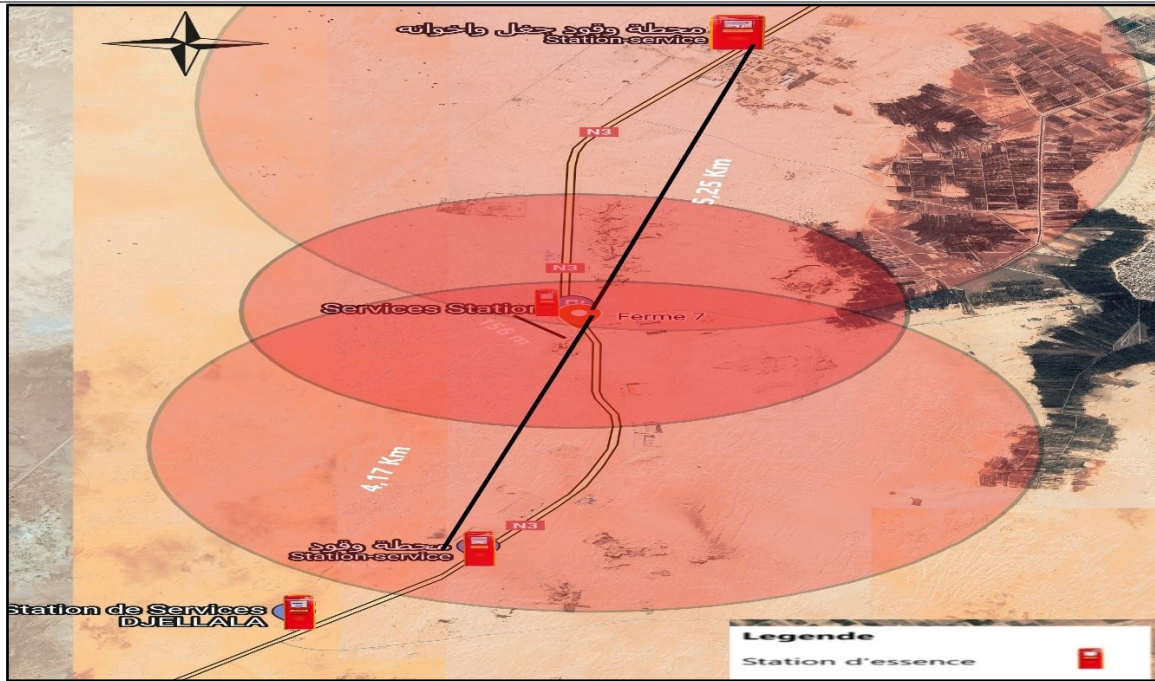


Elevage 5

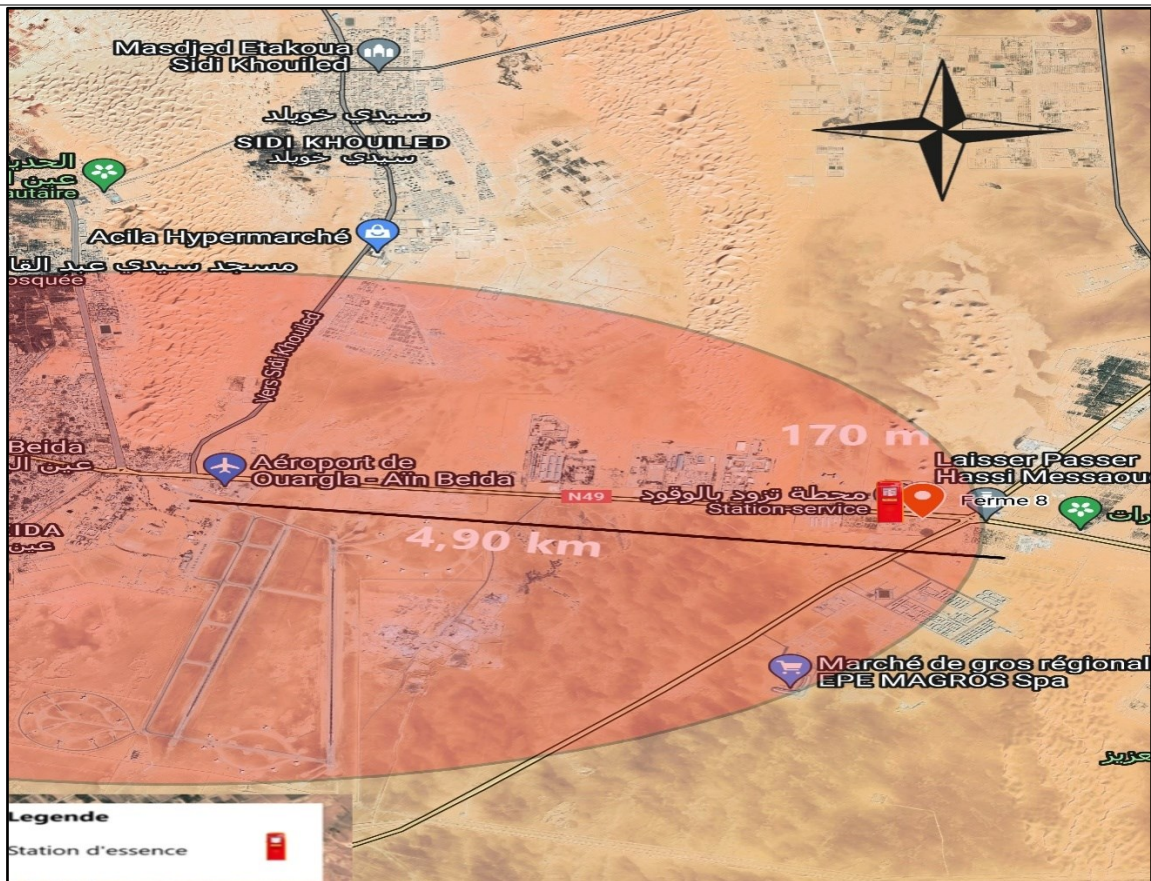


Elevage 6

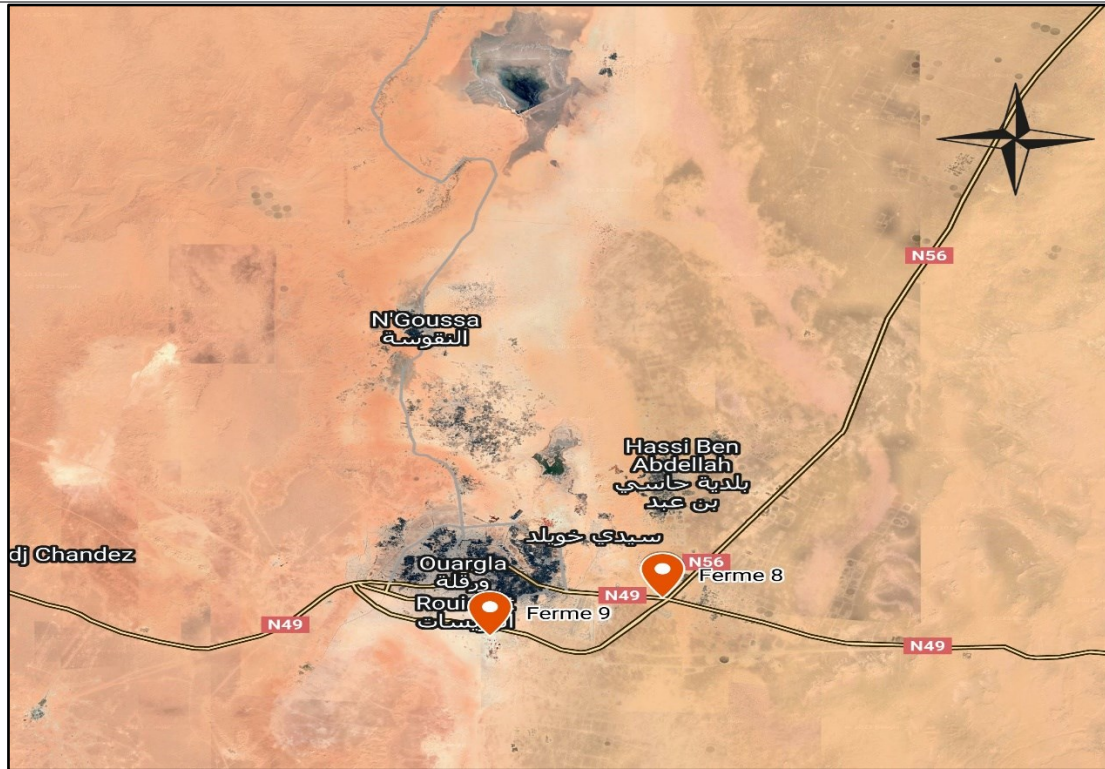




Elevage 7



Elevage 8



Elevage 9



Elevage 10

Figure. Localisations des dix élevages et source de pollution.

**Annexe 3. Résultats bruts des analyses des métaux selon la matrice, la zone de collecte et la saison**

<b>Résultats Bruts des concentrations du Plomb dans le lait de chamelle selon l'élevage et la saison</b>										
Saison	Hiver (Janvier 2021)		Printemps (Mars 2021)		Été (Juin 2021)		Automne (Septembre 2021)		Concentration moyenne par élevage (µg/Kg)	Ecart type (µg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)		
Elevage 1	1	23.82	31	16.68	61	19.74	91	23.31	26.36	12.59
	2	16.62	32	57.27	62	16.8	92	24.57		
	3	42.36	33	17.52	63	35.97	93	21.75		
Elevage 2	4	46.08	34	43.38	64	20.28	94	13.62	29.93	12.96
	5	22.74	35	17.73	65	16.32	95	22.83		
	6	45.6	36	47.22	66	37.23	96	26.13		
Elevage 3	7	22.23	37	16.86	67	19.32	97	14.25	17.75	5.82
	8	13.29	38	16.11	68	13.5	98	24.18		
	9	15.93	39	30.48	69	18.63	99	8.28		
Elevage 4	10	16.32	40	32.25	70	19.2	100	24.03	23.76	11.86
	11	15.72	41	48	71	19.47	101	21.96		
	12	45.18	42	14.85	72	14.97	102	13.23		
Elevage 5	13	16.83	43	18.15	73	17.76	103	11.52	21.72	8.96
	14	16.26	44	22.11	74	41.16	104	38.52		
	15	16.08	45	20.4	75	19.74	105	22.2		

**Suite de Résultats Bruts des concentrations du Plomb dans le lait de chamelle selon l'élevage et la saison**

Saison	Hiver (Janvier 2021)		Printemps (Mars 2021)		Été (Juin 2021)		Automne (Septembre 2021)		Concentration moyenne par élevage (µg/Kg)	Ecart type (µg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)		
Elevage 6	16	15.33	46	14.28	76	45.6	106	22.11	22.01	11.98
	17	16.68	47	14.79	77	21.66	107	17.55		
	18	15.84	48	14.16	78	17.64	108	48.48		
Elevage 7	19	46.41	49	46.05	79	43.62	109	31.68	42.77	8.11
	20	36.03	50	46.71	80	48.09	110	43.8		
	21	47.55	51	46.92	81	52.44	111	23.97		
Elevage 8	22	49.02	52	47.13	82	32.01	112	43.17	35.66	14.62
	23	16.8	53	19.2	83	21.54	113	51.12		
	24	46.05	54	53.01	84	35.61	114	13.32		
Elevage 9	25	15.69	55	35.16	85	15.96	115	24.51	21.90	9.10
	26	23.1	56	16.11	86	21.66	116	21.99		
	27	15.69	57	15.54	87	43.68	117	13.77		
Elevage 10	28	11.55	58	46.92	88	19.8	118	13.86	21.3	10.73
	29	15.9	59	39.3	89	19.05	119	14.94		
	30	15.54	60	16.32	90	20.13	120	22.29		
Moyenne ± écart type (µg/Kg)	24,703±13,184		29,467±14,530		27,150±12,442		24,26±11,08			
Plage de concentrations (µg/Kg)	[11,55 – 49,02]		[14,16– 57,27]		[13,50 – 53,01]		[8,28 – 51,12]			

<b>Résultats Bruts des concentrations du Cadmium dans le lait de chamelle selon l'élevage et la saison</b>										
Saison	Hiver (Janvier 2021) n=30		Printemps (Mars 2021) n=30		Été (Juin 2021) n=30		Automne (Septembre 2021) n=30		Concentration moyenne par élevage (µg/Kg)	Ecart type (µg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)		
Elevage 1	1	1.06	31	1.03	61	1.07	91	0.76	0.92	0.24
	2	1.02	32	0.85	62	1.03	92	1.11		
	3	0.96	33	0.95	63	0.97	93	0.23		
Elevage 2	4	1.04	34	0.95	64	0.97	94	0.99	0.97	0.08
	5	1.12	35	0.93	65	1.01	95	0.82		
	6	0.96	36	0.90	66	1.07	96	0.92		
Elevage 3	7	1.14	37	0.98	67	0.98	97	0.53	0.91	0.28
	8	1.00	38	1.06	68	1.11	98	1.14		
	9	1.00	39	0.97	69	0.87	99	0.17		
Elevage 4	10	0.95	40	0.99	70	0.96	100	0.82	1.00	0.09
	11	1.11	41	1.02	71	1.01	101	1.15		
	12	0.94	42	1.04	72	0.94	102	1.02		
Elevage 5	13	0.87	43	1.00	73	0.96	103	0.81	0.91	0.11
	14	0.98	44	1.01	74	0.84	104	0.91		
	15	0.65	45	0.91	75	1.06	105	0.97		
Elevage 6	16	1.03	46	0.85	76	0.92	106	1.18	0.97	0.14
	17	1.11	47	0.65	77	0.93	107	1.05		
	18	1.05	48	0.98	78	1.00	108	0.92		
Elevage 7	19	1.08	49	1.08	79	1.09	109	0.99	1.04	0.08
	20	0.93	50	1.19	80	0.96	110	0.92		
	21	1.04	51	1.10	81	1.05	111	1.05		

**Suite de Résultats Bruts des concentrations du Cadmium dans le lait de chamelle selon l'élevage et la saison**

Saison	Hiver (Janvier 2021) n=30		Printemps (Mars 2021) n=30		Eté (Juin 2021) n=30		Automne (Septembre 2021) n=30		Concentration moyenne par élevage (µg/Kg)	Ecart type (µg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)		
Elevage 8	22	0.89	52	1.08	82	0.95	112	1.04	0.96	0.08
	23	0.89	53	0.92	83	0.98	113	0.99		
	24	1.03	54	1.02	84	0.83	114	0.88		
Elevage 9	25	0.82	55	1.07	85	1.01	115	0.99	0.89	0.25
	26	0.96	56	1.03	86	0.97	116	0.82		
	27	0.96	57	0.91	87	1.02	117	0.15		
Elevage 10	28	0.76	58	0.58	88	0.92	118	0.75	0.88	0.15
	29	1.01	59	1.01	89	0.99	119	0.68		
	30	1.02	60	0.96	90	1.01	120	0.85		
Moyenne ± écart type (µg/Kg)	0,979±0,108		0,967±0,122		0,983±0,068		0,854±0,269			
Plage de concentrations (µg/Kg)	[0,65 – 1,14]		[0,58 – 1,19]		[0,83 – 1,11]		[0,15 – 1,18]			

<b>Résultats Bruts des concentrations du Mercure dans le lait de chamelle selon l'élevage et la saison</b>										
Saison	Hiver (Janvier 2021) n=30		Printemps (Mars 2021) n=30		Été (Juin 2021) n=30		Automne (Septembre 2021) n=30		Concentration moyenne par élevage (µg/Kg)	Ecart type (µg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)		
Elevage 1	1	0.24	31	0.23	61	0.41	91	0.21	0.31	0.17
	2	0.33	32	0.17	62	0.33	92	0.23		
	3	0.43	33	0.78	63	0.21	93	0.17		
Elevage 2	4	0.55	34	0.18	64	0.98	94	0.57	0.54	0.25
	5	0.59	35	0.21	65	0.89	95	0.49		
	6	0.58	36	0.57	66	0.21	96	0.67		
Elevage 3	7	0.64	37	0.36	67	0.33	97	0.33	0.45	0.11
	8	0.42	38	0.50	68	0.46	98	0.57		
	9	0.47	39	0.35	69	0.36	99	0.6		
Elevage 4	10	0.52	40	1.02	70	0.87	100	0.57	0.59	0.21
	11	0.57	41	0.43	71	0.32	101	0.62		
	12	0.61	42	0.68	72	0.23	102	0.63		
Elevage 5	13	0.52	43	0.29	73	0.52	103	0.57	0.53	0.18
	14	0.58	44	0.98	74	0.65	104	0.5		
	15	0.53	45	0.22	75	0.54	105	0.51		
Elevage 6	16	0.59	46	0.34	76	0.32	106	0.56	0.52	0.17
	17	0.53	47	0.21	77	0.63	107	0.5		
	18	0.60	48	0.89	78	0.54	108	0.58		
Elevage 7	19	0.63	49	0.62	79	0.8	109	0.59	0.56	0.14
	20	0.60	50	0.58	80	0.17	110	0.62		
	21	0.50	51	0.58	81	0.54	111	0.53		

**Suite de Résultats Bruts des concentrations du Mercure dans le lait de chamelle selon l'élevage et la saison**

	Hiver (Janvier 2021) n=30		Printemps (Mars 2021) n=30		Été (Juin 2021) n=30		Automne (Septembre 2021) n=30		Concentration moyenne par élevage (µg/Kg)	Ecart type (µg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)		
Elevage 8	22	0.34	52	0.44	82	0.59	112	0.54	0.47	0.16
	23	0.56	53	0.65	83	0.23	113	0.65		
	24	0.53	54	0.36	84	0.2	114	0.59		
Elevage 9	25	0.57	55	0.56	85	0.41	115	0.6	0.53	0.09
	26	0.63	56	0.52	86	0.32	116	0.58		
	27	0.52	57	0.50	87	0.56	117	0.61		
Elevage 10	28	0.57	58	0.54	88	0.43	118	0.51	0.52	0.10
	29	0.65	59	0.55	89	0.23	119	0.54		
	30	0.56	60	0.56	90	0.5	120	0.55		
Moyenne ± écart type (µg/Kg)	0,532±0,096		0,496±0,227		0,459±0,220		0,526±0,126			
Plage de concentrations (µg/Kg)	[0,24 – 0,65]		[0,17 – 1,02]		[0,17 – 0,98]		[0,17 – 0,67]			



<b>Résultats Bruts des concentrations du Nickel dans le lait de chamelle selon l'élevage et la saison</b>										
Saison	Hiver (Janvier 2021) n=30		Printemps (Mars 2021) n=30		Été (Juin 2021) n=30		Automne (Septembre 2021) n=30		Concentration moyenne par élevage (µg/Kg)	Ecart type (µg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)		
Elevage 1	1	20.64	31	18.22	61	19.23	91	17.6	17.14	1.82
	2	18.06	32	14.96	62	15	92	14.84		
	3	15.63	33	16.80	63	17.9	93	16.83		
Elevage 2	4	17.53	34	17.49	64	15.9	94	19.4	17.16	1.66
	5	17.08	35	15.86	65	14.95	95	17.19		
	6	20.32	36	16.55	66	15.08	96	18.59		
Elevage 3	7	10.87	37	16.83	67	9.23	97	19.58	14.73	3.74
	8	17.29	38	10.06	68	15	98	10.17		
	9	15.73	39	19.21	69	17.9	99	14.94		
Elevage 4	10	15.61	40	15.90	70	19.38	100	19.05	17.20	1.97
	11	17.97	41	14.95	71	16.87	101	15.61		
	12	15.92	42	15.08	72	20.08	102	19.97		
Elevage 5	13	14.90	43	16.06	73	19.23	103	18.2	16.61	1.37
	14	15.06	44	17.59	74	15	104	16.72		
	15	16.06	45	16.20	75	17.9	105	16.39		
Elevage 6	16	15.31	46	16.00	76	16.06	106	18.85	17.54	1.77
	17	19.17	47	15.00	77	17.59	107	19.57		
	18	18.70	48	17.90	78	16.20	108	20.12		
Elevage 7	19	20.11	49	17.73	79	15.9	109	19.02	17.18	1.86
	20	17.85	50	16.47	80	14.95	110	15.6		
	21	16.91	51	16.19	81	15.08	111	20.4		

**Suite de Résultats Bruts des concentrations du Nickel dans le lait de chamelle selon l'élevage et la saison**

Saison	Hiver (Janvier 2021) n=30		Printemps (Mars 2021) n=30		Été (Juin 2021) n=30		Automne (Septembre 2021) n=30		Concentration moyenne par élevage (µg/Kg)	Ecart type (µg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/Kg)		
Elevage 8	22	17.55	52	19.38	82	15.9	112	16.53	17.57	1.96
	23	16.20	53	16.87	83	14.95	113	20.71		
	24	19.31	54	20.08	84	15.08	114	18.29		
Elevage 9	25	15.35	55	17.84	85	19.38	115	17.96	17.11	1.54
	26	16.09	56	15.94	86	16.87	116	15.91		
	27	16.38	57	15.48	87	20.08	117	18.02		
Elevage 10	28	16.62	58	16.08	88	16.06	118	16.75	16.24	0.68
	29	16.74	59	15.46	89	17.59	119	16.73		
	30	15.62	60	15.79	90	16.2	120	15.22		
Moyenne ± écart type (µg/Kg)	16,886±1,972		16,466±1,802		16,551±2,198		17,492±2,197			
Plage de concentrations (µg/Kg)	[10,87 – 20,64]		[10,06 – 19,38]		[9,23 – 20,08]		[10,17 – 20,71]			

Résultats Bruts des concentrations du Plomb dans le sol selon l'élevage et la saison										
Saison	Hiver (Janvier 2021) n=10		Printemps (Mars 2021) n=10		Eté (Juin 2021) n=10		Automne (Septembre 2021) n=10		Concentration moyenne par élevage (mg/Kg)	Ecart type (mg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)		
Elevage 1	1	42.16	11	47.91	21	40.09	31	37.62	41.94	4.39
Elevage 2	2	31.66	12	42.03	22	36.33	32	48.68	39.67	7.35
Elevage 3	3	29.42	13	38.27	23	36.76	33	28.17	33.15	5.10
Elevage 4	4	27.53	14	36.05	24	50.66	34	43.88	39.53	9.98
Elevage 5	5	31.04	15	39.77	25	37.52	35	34.26	35.65	3.82
Elevage 6	6	29.68	16	45.04	26	41.03	36	30.85	36.65	7.57
Elevage 7	7	59.60	17	67.42	27	55.14	37	52.96	58.78	6.39
Elevage 8	8	44.94	18	53.61	28	30.48	38	37.33	41.59	9.95
Elevage 9	9	36.30	19	28.55	29	27.99	39	61.46	38.58	15.72
Elevage 10	10	54.03	20	28.98	30	33.01	40	25.98	35.50	12.68
Moyenne (mg/Kg)	38.63		42.76		38.90		40.12			
Ecart-type (mg/Kg)	11.20		11.66		8.47		11.47			
Minimum (mg/Kg)	27.53		28.55		27.99		25.98			
Maximum (mg/Kg)	59.60		67.42		55.14		61.46			

<b>Résultats Bruts des concentrations du Cadmium dans le sol selon l'élevage et la saison</b>										
Saison	Hiver (Janvier 2021) n=10		Printemps (Mars 2021) n=10		Eté (Juin 2021) n=10		Automne (Septembre 2021) n=10		Concentration moyenne par élevage (mg/Kg)	Ecart type (mg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)		
Elevage 1	1	0.42	11	0.35	21	0.46	31	0.20	0.35	0.11
Elevage 2	2	0.57	12	0.22	22	0.22	32	0.23	0.31	0.17
Elevage 3	3	0.48	13	0.15	23	1.28	33	1.06	0.74	0.52
Elevage 4	4	0.22	14	1.24	24	1.94	34	0.67	1.02	0.75
Elevage 5	5	0.28	15	1.02	25	1.24	35	1.15	0.93	0.44
Elevage 6	6	0.27	16	0.47	26	1.08	36	0.55	0.59	0.35
Elevage 7	7	1.73	17	2.67	27	2.20	37	1.47	2.02	0.53
Elevage 8	8	1.23	18	1.60	28	1.43	38	2.60	1.71	0.61
Elevage 9	9	1.01	19	1.24	29	0.21	39	0.42	0.72	0.48
Elevage 10	10	1.18	20	1.39	30	0.98	40	0.22	0.94	0.51
Moyenne (mg/Kg)	0.74		1.03		1.10		0.86			
Ecart-type (mg/Kg)	0.52		0.78		0.67		0.75			
Minimum (mg/Kg)	0.22		0.15		0.21		0.20			
Maximum (mg/Kg)	1.73		2.67		2.20		2.60			

<b>Résultats Bruts des concentrations du Nickel dans le sol selon l'élevage et la saison</b>										
Saison	Hiver (Janvier 2021) n=10		Printemps (Mars 2021) n=10		Été (Juin 2021) n=10		Automne (Septembre 2021) n=10		Concentration moyenne par élevage (mg/Kg)	Ecart type (mg/Kg)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)	Numéro de l'échantillon	Concentration (mg/Kg)		
Elevage 1	1	38.96	11	23.30	21	21.60	31	31.60	28.86	8.02
Elevage 2	8	31.29	18	22.36	28	21.88	38	38.66	28.55	8.01
Elevage 3	3	26.86	13	28.64	23	36.21	33	22.47	28.55	5.73
Elevage 4	4	38.53	14	34.12	24	33.95	34	19.45	31.51	8.31
Elevage 5	5	30.09	15	39.67	25	18.87	35	20.26	27.22	9.68
Elevage 6	6	23.91	16	28.57	26	37.32	36	25.82	28.90	5.93
Elevage 7	7	27.36	17	28.45	27	25.57	37	28.14	27.38	1.29
Elevage 8	2	22.10	12	25.81	22	31.50	32	28.71	27.03	4.03
Elevage 9	9	28.25	19	25.08	29	28.71	39	27.07	27.28	1.62
Elevage 10	10	24.89	20	19.38	30	18.27	40	19.82	20.59	2.94
Moyenne (mg/Kg)	29.22		27.54		27.39		26.20			
Ecart-type (mg/Kg)	5.72		5.91		7.16		6.06			
Minimum (mg/Kg)	22.10		19.38		18.27		19.45			
Maximum (mg/Kg)	38.96		39.67		37.32		38.66			

Résultats Bruts des concentrations du Plomb dans l'eau d'abreuvement selon l'élevage et la saison										
Saison	Hiver (Janvier 2021) n=10		Printemps (Mars 2021) n=10		Été (Juin 2021) n=10		Automne (Septembre 2021) n=10		Concentration moyenne par élevage (µg/l)	Ecart type (µg/l)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/l)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/l)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/l)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/l)		
Elevage 1	1	1.73	11	12.79	21	8.32	31	6.16	7.25	4.60
Elevage 2	8	6.89	18	7.36	28	11.36	38	14.47	10.02	3.58
Elevage 3	3	9.33	13	16.73	23	6.25	33	7.73	10.01	4.66
Elevage 4	4	15.60	14	15.05	24	4.01	34	10.88	11.39	5.35
Elevage 5	5	12.73	15	8.45	25	13.53	35	11.34	11.51	2.23
Elevage 6	6	6.93	16	7.79	26	3.43	36	7.75	6.47	2.07
Elevage 7	7	6.18	17	2.45	27	12.74	37	7.38	7.19	4.26
Elevage 8	2	18.27	12	8.29	22	9.42	32	11.38	11.84	4.47
Elevage 9	9	7.04	19	3.18	29	6.08	39	11.70	7.00	3.54
Elevage 10	10	5.84	20	11.16	30	15.66	40	2.30	8.74	5.88
Moyenne (µg/l)	9.05		9.32		9.08		9.11			
Ecart-type (µg/l)	5.02		4.67		4.18		3.51			
Minimum (µg/l)	1.73		2.45		3.43		2.30			
Maximum (µg/l)	18.27		16.73		15.66		14.47			

Résultats Bruts des concentrations du Cadmium dans l'eau d'abreuvement selon l'élevage et la saison										
Saison	Hiver (Janvier 2021) n=10		Printemps (Mars 2021) n=10		Été (Juin 2021) n=10		Automne (Septembre 2021) n=10		Concentration moyenne par élevage (µg/l)	Ecart type (µg/l)
	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/l)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/l)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/l)	Numéro de l'échantillon	Concentration (µg/l)		
<b>Elevage 1</b>	1	0.38	11	0.63	21	0.16	31	0.43	0.40	0.20
<b>Elevage 2</b>	8	0.26	18	0.17	28	0.51	38	0.28	0.31	0.14
<b>Elevage 3</b>	3	0.17	13	0.30	23	0.77	33	0.27	0.38	0.27
<b>Elevage 4</b>	4	0.68	14	0.15	24	1.01	34	0.72	0.64	0.36
<b>Elevage 5</b>	5	0.44	15	0.64	25	0.61	35	0.21	0.47	0.20
<b>Elevage 6</b>	6	0.37	16	0.82	26	0.30	36	0.21	0.43	0.27
<b>Elevage 7</b>	7	0.26	17	0.64	27	1.00	37	0.57	0.62	0.31
<b>Elevage 8</b>	2	0.16	12	0.27	22	0.19	32	0.14	0.19	0.06
<b>Elevage 9</b>	9	0.47	19	0.18	29	0.40	39	0.21	0.31	0.14
<b>Elevage 10</b>	10	0.29	20	0.25	30	0.67	40	0.15	0.34	0.23
<b>Moyenne (µg/l)</b>	0.35		0.41		0.56		0.32			
<b>Ecart-type (µg/l)</b>	0.16		0.25		0.31		0.19			
<b>Minimum (µg/l)</b>	0.16		0.15		0.16		0.14			
<b>Maximum (µg/l)</b>	0.68		0.82		1.01		0.72			

<b>Résultats Bruts des concentrations du Nickel dans l'eau d'abreuvement selon l'élevage et la saison</b>										
<b>Saison</b>	<b>Hiver (Janvier 2021) n=10</b>		<b>Printemps (Mars 2021) n=10</b>		<b>Été (Juin 2021) n=10</b>		<b>Automne (Septembre 2021) n=10</b>		<b>Concentration n moyenne par élevage (µg/l)</b>	<b>Ecart type (µg/l)</b>
	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (µg/l)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (µg/l)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (µg/l)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (µg/l)</b>		
<b>Elevage 1</b>	1	14.34	11	13.39	21	11.15	31	16.74	13.91	2.32
<b>Elevage 2</b>	8	12.56	18	11.78	28	9.03	38	8.69	10.52	1.94
<b>Elevage 3</b>	3	15.17	13	17.10	23	14.76	33	16.58	15.90	1.12
<b>Elevage 4</b>	4	19.41	14	20.17	24	23.46	34	18.11	20.29	2.28
<b>Elevage 5</b>	5	16.10	15	19.94	25	19.61	35	31.07	21.68	6.50
<b>Elevage 6</b>	6	27.53	16	29.98	26	26.29	36	24.92	27.18	2.15
<b>Elevage 7</b>	7	13.28	17	14.58	27	13.18	37	13.76	13.70	0.64
<b>Elevage 8</b>	2	25.99	12	7.84	22	15.76	32	13.20	15.70	7.61
<b>Elevage 9</b>	9	12.51	19	8.64	29	15.60	39	16.40	13.29	3.52
<b>Elevage 10</b>	10	12.44	20	13.05	30	15.09	40	13.44	13.51	1.13
<b>Moyenne (µg/l)</b>	16.93		15.65		16.39		17.29			
<b>Ecart-type (µg/l)</b>	5.61		6.54		5.33		6.40			
<b>Minimum (µg/l)</b>	12.44		7.84		9.03		8.69			
<b>Maximum (µg/l)</b>	27.53		29.98		26.29		31.07			



<b>Résultats Bruts des concentrations du Mercure dans l'eau d'abreuvement selon l'élevage et la saison</b>										
<b>Saison</b>	<b>Hiver (Janvier 2021) n=10</b>		<b>Printemps (Mars 2021) n=10</b>		<b>Été (Juin 2021) n=10</b>		<b>Automne (Septembre 2021) n=10</b>		<b>Concentration moyenne par élevage (µg/l)</b>	<b>Ecart type (µg/l)</b>
	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (µg/l)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (µg/l)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (µg/l)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (µg/l)</b>		
<b>Élevage 1</b>	1	0.51	11	0.51	21	0.17	31	0.31	0.37	0.17
<b>Élevage 2</b>	8	0.34	18	ND	28	0.17	38	1.32	0.52	0.53
<b>Élevage 3</b>	3	0.54	13	0.60	23	0.18	33	0.62	0.48	0.21
<b>Élevage 4</b>	4	1.00	14	1.27	24	0.53	34	ND	0.74	0.49
<b>Élevage 5</b>	5	0.43	15	0.53	25	0.35	35	0.06	0.34	0.20
<b>Élevage 6</b>	6	0.52	16	0.23	26	0.61	36	1.28	0.66	0.45
<b>Élevage 7</b>	7	0.43	17	0.33	27	ND	37	0.71	0.39	0.25
<b>Élevage 8</b>	2	0.83	12	0.18	22	0.32	32	0.56	0.47	0.28
<b>Élevage 9</b>	9	0.33	19	1.22	29	0.48	39	0.82	0.71	0.40
<b>Élevage 10</b>	10	0.66	20	0.30	30	0.93	40	0.61	0.63	0.26
<b>Moyenne (µg/l)</b>	0.56		0.54		0.38		0.65			
<b>Ecart-type (µg/l)</b>	0.22		0.39		0.26		0.42			
<b>Minimum (µg/l)</b>	0.33		0.18		0.10		0.06			
<b>Maximum (µg/l)</b>	1.00		1.27		0.93		1.32			

<b>Résultats Bruts des concentrations du Plomb dans les plantes récoltées selon l'élevage et la saison</b>										
<b>Saison</b>	<b>Hiver (Janvier 2021) n=10</b>		<b>Printemps (Mars 2021) n=10</b>		<b>Été (Juin 2021) n=10</b>		<b>Automne (Septembre 2021) n=10</b>		<b>Concentration moyenne par élevage (mg/Kg)</b>	<b>Ecart type (mg/Kg)</b>
	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (mg/Kg)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (mg/Kg)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (mg/Kg)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (mg/Kg)</b>		
<b>Elevage 1</b>	1	2.47	11	8.55	21	1.70	31	1.31	3.51	3.40
<b>Elevage 2</b>	2	7.64	12	12.51	22	6.42	32	5.17	7.94	3.21
<b>Elevage 3</b>	3	13.43	13	12.98	23	12.13	33	11.89	12.61	0.72
<b>Elevage 4</b>	4	12.43	14	10.58	24	12.01	34	12.70	11.93	0.94
<b>Elevage 5</b>	5	8.98	15	11.91	25	13.29	35	8.31	10.62	2.37
<b>Elevage 6</b>	6	4.13	16	6.98	26	5.43	36	2.07	4.65	2.08
<b>Elevage 7</b>	7	9.34	17	11.18	27	8.04	37	10.17	9.68	1.33
<b>Elevage 8</b>	8	13.43	13	12.98	23	12.13	33	11.89	12.61	0.72
<b>Elevage 9</b>	9	1.12	19	2.03	29	1.08	39	3.32	1.89	1.05
<b>Elevage 10</b>	10	6.09	20	3.70	30	2.69	40	2.81	3.82	1.58
<b>Moyenne (mg/Kg)</b>	7.91		9.34		7.49		6.96			
<b>Ecart-type (mg/Kg)</b>	4.45		3.94		4.72		4.51			
<b>Minimum (mg/Kg)</b>	1.12		2.03		1.08		1.31			
<b>Maximum (mg/Kg)</b>	13.43		12.98		13.29		12.70			

<b>Résultats Bruts des concentrations du Cadmium dans les plantes récoltées selon l'élevage et la saison</b>										
<b>Saison</b>	<b>Hiver (Janvier 2021) n=10</b>		<b>Printemps (Mars 2021) n=10</b>		<b>Été (Juin 2021) n=10</b>		<b>Automne (Septembre 2021) n=10</b>		<b>Concentration moyenne par élevage (mg/Kg)</b>	<b>Ecart type (mg/Kg)</b>
	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (mg/Kg)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (mg/Kg)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (mg/Kg)</b>	<b>Numéro de l'échantillon</b>	<b>Concentration (mg/Kg)</b>		
<b>Elevage 1</b>	1	0.22	11	0.21	21	0.34	31	0.13	0.22	0.09
<b>Elevage 2</b>	2	0.19	12	0.32	22	0.12	32	0.17	0.20	0.09
<b>Elevage 3</b>	3	0.83	13	0.85	23	0.40	33	0.58	0.66	0.21
<b>Elevage 4</b>	4	1.07	14	1.20	24	0.64	34	0.86	0.94	0.25
<b>Elevage 5</b>	5	0.57	15	0.70	25	0.20	35	0.58	0.51	0.22
<b>Elevage 6</b>	6	0.30	16	0.38	26	0.13	36	0.38	0.30	0.12
<b>Elevage 7</b>	7	0.11	17	0.70	27	0.91	37	0.74	0.62	0.35
<b>Elevage 8</b>	8	0.57	18	1.20	28	0.93	38	1.04	0.93	0.27
<b>Elevage 9</b>	9	1.40	19	1.24	29	0.52	39	0.89	1.01	0.39
<b>Elevage 10</b>	10	0.67	20	0.60	30	1.06	40	0.15	0.62	0.38
<b>Moyenne (mg/Kg)</b>	0.59		0.74		0.53		0.55			
<b>Ecart-type (mg/Kg)</b>	0.42		0.38		0.35		0.33			
<b>Minimum (mg/Kg)</b>	0.11		0.21		0.12		0.13			
<b>Maximum (mg/Kg)</b>	1.40		1.24		1.06		1.04			

**Résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
6.11E-05	2.27E-06	1.41E-06	8.39E-05	2.38E-04	8.83E-06	5.50E-06	3.26E-04	1.24E-02	1.62E-03	3.36E-03	2.99E-03	1.67E-02	2.18E-03	4.52E-03	4.02E-03	3.70E-07	2.43E-05	4.98E-07	3.27E-05
1.04E-04	4.89E-06	2.44E-06	4.36E-05	4.03E-04	1.90E-05	9.50E-06	1.70E-04	2.11E-02	3.48E-03	5.80E-03	1.55E-03	2.84E-02	4.68E-03	7.81E-03	2.09E-03	6.27E-07	5.22E-05	8.45E-07	7.03E-05
3.55E-05	7.29E-07	2.57E-06	6.40E-05	1.38E-04	2.83E-06	1.00E-05	2.49E-04	7.22E-03	5.19E-04	6.11E-03	2.28E-03	9.72E-03	6.99E-04	8.22E-03	3.07E-03	2.15E-07	7.78E-06	2.89E-07	1.05E-05
1.36E-04	4.24E-06	2.53E-06	8.15E-05	5.28E-04	1.65E-05	9.83E-06	3.17E-04	2.76E-02	3.02E-03	6.00E-03	2.90E-03	3.72E-02	4.07E-03	8.08E-03	3.91E-03	8.22E-07	4.53E-05	1.11E-06	6.10E-05
1.88E-04	3.94E-06	2.66E-06	6.69E-05	7.30E-04	1.53E-05	1.03E-05	2.60E-04	3.82E-02	2.81E-03	6.31E-03	2.38E-03	5.14E-02	3.78E-03	8.49E-03	3.21E-03	1.14E-06	4.21E-05	1.53E-06	5.67E-05
1.03E-04	4.50E-06	2.27E-06	8.74E-05	4.00E-04	1.75E-05	8.83E-06	3.40E-04	2.09E-02	3.21E-03	5.39E-03	3.11E-03	2.81E-02	4.32E-03	7.26E-03	4.19E-03	6.22E-07	4.81E-05	8.37E-07	6.47E-05
5.94E-05	3.21E-06	2.19E-06	7.18E-05	2.31E-04	1.25E-05	8.50E-06	2.79E-04	1.21E-02	2.29E-03	5.19E-03	2.56E-03	1.63E-02	3.08E-03	6.99E-03	3.44E-03	3.60E-07	3.43E-05	4.84E-07	4.62E-05
6.40E-05	2.91E-06	2.31E-06	7.17E-05	2.49E-04	1.13E-05	9.00E-06	2.79E-04	1.30E-02	2.08E-03	5.50E-03	2.55E-03	1.75E-02	2.79E-03	7.40E-03	3.44E-03	3.88E-07	3.11E-05	5.22E-07	4.19E-05
9.55E-05	3.64E-06	2.36E-06	6.52E-05	3.72E-04	1.42E-05	9.17E-06	2.54E-04	1.94E-02	2.59E-03	5.60E-03	2.32E-03	2.62E-02	3.49E-03	7.53E-03	3.13E-03	5.78E-07	3.89E-05	7.79E-07	5.24E-05
1.05E-04	4.24E-06	2.57E-06	7.70E-05	4.09E-04	1.65E-05	1.00E-05	2.99E-04	2.14E-02	3.02E-03	6.11E-03	2.74E-03	2.88E-02	4.07E-03	8.22E-03	3.69E-03	6.36E-07	4.53E-05	8.56E-07	6.10E-05
9.42E-05	3.51E-06	2.49E-06	6.82E-05	3.67E-04	1.37E-05	9.67E-06	2.65E-04	1.92E-02	2.50E-03	5.90E-03	2.43E-03	2.58E-02	3.37E-03	7.95E-03	3.27E-03	5.71E-07	3.75E-05	7.68E-07	5.05E-05
5.90E-05	6.43E-07	2.61E-06	7.72E-05	2.30E-04	2.50E-06	1.02E-05	3.00E-04	1.20E-02	4.58E-04	6.21E-03	2.75E-03	1.62E-02	6.16E-04	8.36E-03	3.70E-03	3.57E-07	6.87E-06	4.81E-07	9.25E-06
9.99E-05	3.26E-06	9.00E-07	7.54E-05	3.89E-04	1.27E-05	3.50E-06	2.93E-04	2.03E-02	2.32E-03	2.14E-03	2.69E-03	2.74E-02	3.12E-03	2.88E-03	3.62E-03	6.05E-07	3.48E-05	8.14E-07	4.68E-05

**Suite de résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
1.05E-04	4.76E-06	9.86E-07	6.36E-05	4.10E-04	1.85E-05	3.83E-06	2.47E-04	2.14E-02	3.39E-03	2.34E-03	2.27E-03	2.88E-02	4.56E-03	3.15E-03	3.05E-03	6.38E-07	5.08E-05	8.58E-07	6.84E-05
9.32E-05	9.86E-07	7.29E-07	7.21E-05	3.63E-04	3.83E-06	2.83E-06	2.81E-04	1.90E-02	7.02E-04	1.73E-03	2.57E-03	2.55E-02	9.45E-04	2.33E-03	3.46E-03	5.64E-07	1.05E-05	7.60E-07	1.42E-05
5.84E-05	4.24E-06	2.44E-06	8.31E-05	2.27E-04	1.65E-05	9.50E-06	3.23E-04	1.19E-02	3.02E-03	5.80E-03	2.96E-03	1.60E-02	4.07E-03	7.81E-03	3.99E-03	3.53E-07	4.53E-05	4.76E-07	6.10E-05
9.78E-05	3.51E-06	2.10E-06	7.37E-05	3.81E-04	1.37E-05	8.17E-06	2.87E-04	1.99E-02	2.50E-03	4.99E-03	2.62E-03	2.68E-02	3.37E-03	6.71E-03	3.53E-03	5.92E-07	3.75E-05	7.97E-07	5.05E-05
1.12E-04	3.94E-06	2.87E-06	7.97E-05	4.36E-04	1.53E-05	1.12E-05	3.10E-04	2.28E-02	2.81E-03	6.82E-03	2.84E-03	3.07E-02	3.78E-03	9.18E-03	3.82E-03	6.78E-07	4.21E-05	9.13E-07	5.67E-05
9.48E-05	5.06E-06	2.40E-06	8.08E-05	3.69E-04	1.97E-05	9.33E-06	3.14E-04	1.93E-02	3.60E-03	5.70E-03	2.88E-03	2.60E-02	4.85E-03	7.67E-03	3.87E-03	5.74E-07	5.40E-05	7.72E-07	7.27E-05
7.52E-05	4.50E-06	2.14E-06	8.39E-05	2.93E-04	1.75E-05	8.33E-06	3.26E-04	1.53E-02	3.21E-03	5.09E-03	2.99E-03	2.06E-02	4.32E-03	6.85E-03	4.02E-03	4.55E-07	4.81E-05	6.13E-07	6.47E-05
2.08E-04	3.94E-06	2.49E-06	8.62E-05	8.08E-04	1.53E-05	9.67E-06	3.35E-04	4.23E-02	2.81E-03	5.90E-03	3.07E-03	5.69E-02	3.78E-03	7.95E-03	4.13E-03	1.26E-06	4.21E-05	1.69E-06	5.67E-05
1.03E-04	3.51E-06	2.44E-06	8.16E-05	4.01E-04	1.37E-05	9.50E-06	3.18E-04	2.10E-02	2.50E-03	5.80E-03	2.91E-03	2.82E-02	3.37E-03	7.81E-03	3.91E-03	6.24E-07	3.75E-05	8.39E-07	5.05E-05
9.41E-05	4.93E-06	2.66E-06	6.69E-05	3.66E-04	1.92E-05	1.03E-05	2.60E-04	1.92E-02	3.51E-03	6.31E-03	2.38E-03	2.58E-02	4.73E-03	8.49E-03	3.21E-03	5.70E-07	5.27E-05	7.67E-07	7.09E-05
5.67E-05	4.37E-06	2.70E-06	8.56E-05	2.21E-04	1.70E-05	1.05E-05	3.33E-04	1.15E-02	3.11E-03	6.41E-03	3.05E-03	1.55E-02	4.19E-03	8.63E-03	4.10E-03	3.43E-07	4.67E-05	4.62E-07	6.29E-05
4.94E-05	3.47E-06	2.44E-06	7.80E-05	1.92E-04	1.35E-05	9.50E-06	3.03E-04	1.00E-02	2.47E-03	5.80E-03	2.78E-03	1.35E-02	3.33E-03	7.81E-03	3.74E-03	2.99E-07	3.71E-05	4.02E-07	4.99E-05

**Suite de résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
1.65E-04	3.90E-06	2.14E-06	7.17E-05	6.42E-04	1.52E-05	8.33E-06	2.79E-04	3.36E-02	2.78E-03	5.09E-03	2.55E-03	4.52E-02	3.74E-03	6.85E-03	3.44E-03	1.00E-06	4.17E-05	1.35E-06	5.61E-05
9.51E-05	4.16E-06	2.19E-06	7.02E-05	3.70E-04	1.62E-05	8.50E-06	2.73E-04	1.94E-02	2.96E-03	5.19E-03	2.50E-03	2.61E-02	3.99E-03	6.99E-03	3.37E-03	5.76E-07	4.44E-05	7.75E-07	5.98E-05
1.85E-04	4.46E-06	2.31E-06	7.08E-05	7.20E-04	1.73E-05	9.00E-06	2.76E-04	3.77E-02	3.17E-03	5.50E-03	2.52E-03	5.07E-02	4.27E-03	7.40E-03	3.40E-03	1.12E-06	4.76E-05	1.51E-06	6.41E-05
2.19E-04	4.24E-06	2.79E-06	8.88E-05	8.52E-04	1.65E-05	1.08E-05	3.45E-04	4.46E-02	3.02E-03	6.61E-03	3.16E-03	6.00E-02	4.07E-03	8.90E-03	4.26E-03	1.33E-06	4.53E-05	1.79E-06	6.10E-05
5.71E-05	3.77E-06	2.53E-06	7.84E-05	2.22E-04	1.47E-05	9.83E-06	3.05E-04	1.16E-02	2.69E-03	6.00E-03	2.79E-03	1.56E-02	3.62E-03	8.08E-03	3.76E-03	3.46E-07	4.03E-05	4.65E-07	5.42E-05
9.53E-05	4.89E-06	2.74E-06	4.66E-05	3.71E-04	1.90E-05	1.07E-05	1.81E-04	1.94E-02	3.48E-03	6.51E-03	1.66E-03	2.61E-02	4.68E-03	8.77E-03	2.23E-03	5.77E-07	5.22E-05	7.77E-07	7.03E-05
5.70E-05	4.29E-06	1.80E-06	7.41E-05	2.22E-04	1.67E-05	7.00E-06	2.88E-04	1.16E-02	3.05E-03	4.27E-03	2.64E-03	1.56E-02	4.11E-03	5.75E-03	3.55E-03	3.45E-07	4.58E-05	4.64E-07	6.16E-05
6.83E-05	4.29E-06	2.01E-06	6.74E-05	2.66E-04	1.67E-05	7.83E-06	2.62E-04	1.39E-02	3.05E-03	4.78E-03	2.40E-03	1.87E-02	4.11E-03	6.44E-03	3.23E-03	4.13E-07	4.58E-05	5.56E-07	6.16E-05
1.99E-04	4.63E-06	2.70E-06	8.62E-05	7.74E-04	1.80E-05	1.05E-05	3.35E-04	4.05E-02	3.30E-03	6.41E-03	3.07E-03	5.45E-02	4.44E-03	8.63E-03	4.13E-03	1.20E-06	4.95E-05	1.62E-06	6.66E-05
1.54E-04	3.99E-06	2.57E-06	7.65E-05	6.01E-04	1.55E-05	1.00E-05	2.98E-04	3.14E-02	2.84E-03	6.11E-03	2.72E-03	4.23E-02	3.82E-03	8.22E-03	3.67E-03	9.35E-07	4.26E-05	1.26E-06	5.73E-05
2.04E-04	4.46E-06	2.14E-06	7.25E-05	7.93E-04	1.73E-05	8.33E-06	2.82E-04	4.15E-02	3.17E-03	5.09E-03	2.58E-03	5.58E-02	4.27E-03	6.85E-03	3.47E-03	1.23E-06	4.76E-05	1.66E-06	6.41E-05
4.95E-05	3.26E-06	2.44E-06	7.12E-05	1.93E-04	1.27E-05	9.50E-06	2.77E-04	1.01E-02	2.32E-03	5.80E-03	2.54E-03	1.36E-02	3.12E-03	7.81E-03	3.42E-03	3.00E-07	3.48E-05	4.03E-07	4.68E-05

**Suite de résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
6.81E-05	4.33E-06	2.79E-06	7.17E-05	2.65E-04	1.68E-05	1.08E-05	2.79E-04	1.39E-02	3.08E-03	6.61E-03	2.56E-03	1.87E-02	4.15E-03	8.90E-03	3.44E-03	4.13E-07	4.63E-05	5.55E-07	6.23E-05
6.66E-05	4.37E-06	2.40E-06	6.69E-05	2.59E-04	1.70E-05	9.33E-06	2.60E-04	1.36E-02	3.11E-03	5.70E-03	2.38E-03	1.82E-02	4.19E-03	7.67E-03	3.21E-03	4.03E-07	4.67E-05	5.43E-07	6.29E-05
6.72E-05	3.51E-06	2.44E-06	6.58E-05	2.62E-04	1.37E-05	9.50E-06	2.56E-04	1.37E-02	2.50E-03	5.80E-03	2.34E-03	1.84E-02	3.37E-03	7.81E-03	3.15E-03	4.07E-07	3.75E-05	5.48E-07	5.05E-05
9.90E-05	4.11E-06	2.70E-06	6.90E-05	3.85E-04	1.60E-05	1.05E-05	2.68E-04	2.01E-02	2.93E-03	6.41E-03	2.46E-03	2.71E-02	3.95E-03	8.63E-03	3.31E-03	5.99E-07	4.40E-05	8.07E-07	5.92E-05
6.72E-05	4.11E-06	2.23E-06	7.02E-05	2.62E-04	1.60E-05	8.67E-06	2.73E-04	1.37E-02	2.93E-03	5.29E-03	2.50E-03	1.84E-02	3.95E-03	7.12E-03	3.37E-03	4.07E-07	4.40E-05	5.48E-07	5.92E-05
1.02E-04	4.54E-06	1.03E-06	8.85E-05	3.97E-04	1.77E-05	4.00E-06	3.44E-04	2.08E-02	3.24E-03	2.44E-03	3.15E-03	2.80E-02	4.36E-03	3.29E-03	4.24E-03	6.18E-07	4.85E-05	8.32E-07	6.53E-05
7.12E-05	4.37E-06	1.41E-06	7.74E-05	2.77E-04	1.70E-05	5.50E-06	3.01E-04	1.45E-02	3.11E-03	3.36E-03	2.76E-03	1.95E-02	4.19E-03	4.52E-03	3.71E-03	4.31E-07	4.67E-05	5.81E-07	6.29E-05
1.82E-04	4.11E-06	1.84E-06	6.70E-05	7.06E-04	1.60E-05	7.17E-06	2.61E-04	3.69E-02	2.93E-03	4.38E-03	2.39E-03	4.97E-02	3.95E-03	5.89E-03	3.21E-03	1.10E-06	4.40E-05	1.48E-06	5.92E-05
1.97E-04	4.46E-06	2.36E-06	7.51E-05	7.68E-04	1.73E-05	9.17E-06	2.92E-04	4.02E-02	3.17E-03	5.60E-03	2.68E-03	5.41E-02	4.27E-03	7.53E-03	3.60E-03	1.20E-06	4.76E-05	1.61E-06	6.41E-05
9.75E-05	4.80E-06	2.53E-06	7.32E-05	3.79E-04	1.87E-05	9.83E-06	2.85E-04	1.98E-02	3.42E-03	6.00E-03	2.61E-03	2.67E-02	4.60E-03	8.08E-03	3.51E-03	5.90E-07	5.13E-05	7.94E-07	6.90E-05
1.95E-04	4.11E-06	2.49E-06	8.71E-05	7.60E-04	1.60E-05	9.67E-06	3.39E-04	3.98E-02	2.93E-03	5.90E-03	3.10E-03	5.35E-02	3.95E-03	7.95E-03	4.18E-03	1.18E-06	4.40E-05	1.59E-06	5.92E-05
6.57E-05	4.41E-06	2.53E-06	6.56E-05	2.56E-04	1.72E-05	9.83E-06	2.55E-04	1.34E-02	3.14E-03	6.00E-03	2.34E-03	1.80E-02	4.23E-03	8.08E-03	3.15E-03	3.98E-07	4.72E-05	5.36E-07	6.35E-05

**Suite de résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
7.15E-05	4.76E-06	2.27E-06	8.22E-05	2.78E-04	1.85E-05	8.83E-06	3.20E-04	1.45E-02	3.39E-03	5.39E-03	2.93E-03	1.96E-02	4.56E-03	7.26E-03	3.94E-03	4.33E-07	5.08E-05	5.83E-07	6.84E-05
6.79E-05	4.50E-06	2.57E-06	8.01E-05	2.64E-04	1.75E-05	1.00E-05	3.12E-04	1.38E-02	3.21E-03	6.11E-03	2.85E-03	1.86E-02	4.32E-03	8.22E-03	3.84E-03	4.11E-07	4.81E-05	5.53E-07	6.47E-05
6.99E-05	4.07E-06	2.23E-06	6.69E-05	2.72E-04	1.58E-05	8.67E-06	2.60E-04	1.42E-02	2.90E-03	5.29E-03	2.38E-03	1.92E-02	3.90E-03	7.12E-03	3.21E-03	4.23E-07	4.35E-05	5.70E-07	5.86E-05
6.74E-05	4.76E-06	2.44E-06	7.70E-05	2.62E-04	1.85E-05	9.50E-06	3.00E-04	1.37E-02	3.39E-03	5.80E-03	2.74E-03	1.85E-02	4.56E-03	7.81E-03	3.69E-03	4.08E-07	5.08E-05	5.49E-07	6.84E-05
1.94E-04	4.03E-06	2.61E-06	6.82E-05	7.53E-04	1.57E-05	1.02E-05	2.65E-04	3.94E-02	2.87E-03	6.21E-03	2.43E-03	5.30E-02	3.86E-03	8.36E-03	3.27E-03	1.17E-06	4.30E-05	1.58E-06	5.79E-05
7.21E-05	3.73E-06	2.23E-06	6.39E-05	2.81E-04	1.45E-05	8.67E-06	2.48E-04	1.47E-02	2.66E-03	5.29E-03	2.27E-03	1.98E-02	3.58E-03	7.12E-03	3.06E-03	4.37E-07	3.98E-05	5.88E-07	5.36E-05
6.97E-05	4.20E-06	2.49E-06	6.45E-05	2.71E-04	1.63E-05	9.67E-06	2.51E-04	1.42E-02	2.99E-03	5.90E-03	2.30E-03	1.91E-02	4.03E-03	7.95E-03	3.09E-03	4.22E-07	4.49E-05	5.68E-07	6.04E-05
6.89E-05	2.79E-06	2.27E-06	6.88E-05	2.68E-04	1.08E-05	8.83E-06	2.68E-04	1.40E-02	1.98E-03	5.39E-03	2.45E-03	1.89E-02	2.67E-03	7.26E-03	3.30E-03	4.17E-07	2.98E-05	5.62E-07	4.01E-05
2.10E-04	3.81E-06	1.46E-06	7.52E-05	8.17E-04	1.48E-05	5.67E-06	2.93E-04	4.28E-02	2.72E-03	3.46E-03	2.68E-03	5.76E-02	3.66E-03	4.66E-03	3.61E-03	1.27E-06	4.08E-05	1.71E-06	5.49E-05
7.20E-05	3.81E-06	2.40E-06	6.94E-05	2.80E-04	1.48E-05	9.33E-06	2.70E-04	1.47E-02	2.72E-03	5.70E-03	2.47E-03	1.97E-02	3.66E-03	7.67E-03	3.33E-03	4.36E-07	4.08E-05	5.87E-07	5.49E-05
1.97E-04	4.41E-06	2.27E-06	8.28E-05	7.68E-04	1.72E-05	8.83E-06	3.22E-04	4.02E-02	3.14E-03	5.39E-03	2.95E-03	5.41E-02	4.23E-03	7.26E-03	3.97E-03	1.19E-06	4.72E-05	1.61E-06	6.35E-05
7.23E-05	4.20E-06	1.54E-06	7.21E-05	2.81E-04	1.63E-05	6.00E-06	2.81E-04	1.47E-02	2.99E-03	3.66E-03	2.57E-03	1.98E-02	4.03E-03	4.93E-03	3.46E-03	4.38E-07	4.49E-05	5.89E-07	6.04E-05
6.90E-05	4.54E-06	2.14E-06	4.31E-05	2.69E-04	1.77E-05	8.33E-06	1.68E-04	1.41E-02	3.24E-03	5.09E-03	1.54E-03	1.89E-02	4.36E-03	6.85E-03	2.07E-03	4.18E-07	4.85E-05	5.63E-07	6.53E-05



**Suite de résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
1.31E-04	4.16E-06	1.50E-06	8.23E-05	5.08E-04	1.62E-05	5.83E-06	3.20E-04	2.66E-02	2.96E-03	3.56E-03	2.93E-03	3.58E-02	3.99E-03	4.79E-03	3.95E-03	7.91E-07	4.44E-05	1.06E-06	5.98E-05
1.97E-04	4.63E-06	2.66E-06	7.60E-05	7.68E-04	1.80E-05	1.03E-05	2.96E-04	4.02E-02	3.30E-03	6.31E-03	2.71E-03	5.41E-02	4.44E-03	8.49E-03	3.64E-03	1.19E-06	4.95E-05	1.61E-06	6.66E-05
2.00E-04	5.10E-06	2.49E-06	7.06E-05	7.79E-04	1.98E-05	9.67E-06	2.75E-04	4.07E-02	3.63E-03	5.90E-03	2.51E-03	5.48E-02	4.89E-03	7.95E-03	3.38E-03	1.21E-06	5.45E-05	1.63E-06	7.34E-05
2.01E-04	4.71E-06	2.49E-06	6.94E-05	7.82E-04	1.83E-05	9.67E-06	2.70E-04	4.09E-02	3.36E-03	5.90E-03	2.47E-03	5.51E-02	4.52E-03	7.95E-03	3.33E-03	1.22E-06	5.04E-05	1.64E-06	6.78E-05
2.01E-04	2.49E-06	2.31E-06	6.89E-05	7.82E-04	9.67E-06	9.00E-06	2.68E-04	4.09E-02	1.77E-03	5.50E-03	2.45E-03	5.51E-02	2.38E-03	7.40E-03	3.30E-03	1.22E-06	2.66E-05	1.64E-06	3.58E-05
1.68E-04	4.33E-06	2.36E-06	6.63E-05	6.55E-04	1.68E-05	9.17E-06	2.58E-04	3.43E-02	3.08E-03	5.60E-03	2.36E-03	4.61E-02	4.15E-03	7.53E-03	3.18E-03	1.02E-06	4.63E-05	1.37E-06	6.23E-05
6.99E-05	4.11E-06	2.40E-06	6.77E-05	2.72E-04	1.60E-05	9.33E-06	2.63E-04	1.42E-02	2.93E-03	5.70E-03	2.41E-03	1.92E-02	3.95E-03	7.67E-03	3.24E-03	4.23E-07	4.40E-05	5.70E-07	5.92E-05
1.51E-04	4.59E-06	2.40E-06	7.65E-05	5.86E-04	1.78E-05	9.33E-06	2.97E-04	3.07E-02	3.27E-03	5.70E-03	2.72E-03	4.13E-02	4.40E-03	7.67E-03	3.67E-03	9.12E-07	4.90E-05	1.23E-06	6.60E-05
6.90E-05	4.41E-06	2.23E-06	6.83E-05	2.69E-04	1.72E-05	8.67E-06	2.66E-04	1.41E-02	3.14E-03	5.29E-03	2.43E-03	1.89E-02	4.23E-03	7.12E-03	3.28E-03	4.18E-07	4.72E-05	5.63E-07	6.35E-05
6.66E-05	3.90E-06	2.14E-06	6.63E-05	2.59E-04	1.52E-05	8.33E-06	2.58E-04	1.36E-02	2.78E-03	5.09E-03	2.36E-03	1.82E-02	3.74E-03	6.85E-03	3.18E-03	4.03E-07	4.17E-05	5.43E-07	5.61E-05
7.15E-05	4.41E-06	9.86E-07	7.81E-05	2.78E-04	1.72E-05	3.83E-06	3.04E-04	1.45E-02	3.14E-03	2.34E-03	2.78E-03	1.96E-02	4.23E-03	3.15E-03	3.74E-03	4.33E-07	4.72E-05	5.83E-07	6.35E-05
2.45E-04	3.64E-06	7.29E-07	6.41E-05	9.55E-04	1.42E-05	2.83E-06	2.49E-04	5.00E-02	2.59E-03	1.73E-03	2.28E-03	6.72E-02	3.49E-03	2.33E-03	3.07E-03	1.49E-06	3.89E-05	2.00E-06	5.24E-05
7.51E-05	4.07E-06	3.34E-06	7.20E-05	2.92E-04	1.58E-05	1.30E-06	2.80E-04	1.53E-02	2.90E-03	7.94E-03	2.56E-03	2.06E-02	3.90E-03	1.07E-02	3.45E-03	4.55E-07	4.35E-05	6.12E-07	5.86E-05

**Suite de résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
1.86E-04	4.07E-06	7.71E-07	7.50E-05	7.23E-04	1.58E-05	3.00E-06	2.92E-04	3.78E-02	2.90E-03	1.83E-03	2.67E-03	5.09E-02	3.90E-03	2.47E-03	3.59E-03	1.13E-06	4.35E-05	1.52E-06	5.86E-05
7.60E-05	3.99E-06	9.00E-07	6.80E-05	2.96E-04	1.55E-05	3.50E-06	2.64E-04	1.55E-02	2.84E-03	2.14E-03	2.42E-03	2.08E-02	3.82E-03	2.88E-03	3.26E-03	4.60E-07	4.26E-05	6.19E-07	5.73E-05
2.02E-04	3.86E-06	2.44E-06	7.09E-05	7.87E-04	1.50E-05	9.50E-06	2.76E-04	4.12E-02	2.75E-03	5.80E-03	2.53E-03	5.54E-02	3.70E-03	7.81E-03	3.40E-03	1.23E-06	4.12E-05	1.65E-06	5.55E-05
6.12E-05	3.64E-06	1.46E-06	6.86E-05	2.38E-04	1.42E-05	5.67E-06	2.67E-04	1.25E-02	2.59E-03	3.46E-03	2.44E-03	1.68E-02	3.49E-03	4.66E-03	3.29E-03	3.71E-07	3.89E-05	4.99E-07	5.24E-05
6.34E-05	2.79E-06	9.00E-07	6.43E-05	2.47E-04	1.08E-05	3.50E-06	2.50E-04	1.29E-02	1.98E-03	2.14E-03	2.29E-03	1.74E-02	2.67E-03	2.88E-03	3.08E-03	3.84E-07	2.98E-05	5.17E-07	4.01E-05
6.07E-05	4.20E-06	3.81E-06	7.67E-05	2.36E-04	1.63E-05	1.48E-05	2.98E-04	1.24E-02	2.99E-03	9.06E-03	2.73E-03	1.66E-02	4.03E-03	1.22E-02	3.68E-03	3.67E-07	4.49E-05	4.95E-07	6.04E-05
1.38E-04	4.24E-06	4.37E-06	6.81E-05	5.38E-04	1.65E-05	1.70E-05	2.65E-04	2.81E-02	3.02E-03	1.04E-02	2.43E-03	3.79E-02	4.07E-03	1.40E-02	3.27E-03	8.37E-07	4.53E-05	1.13E-06	6.10E-05
2.06E-04	4.37E-06	1.84E-06	6.41E-05	8.00E-04	1.70E-05	7.17E-06	2.49E-04	4.19E-02	3.11E-03	4.38E-03	2.28E-03	5.64E-02	4.19E-03	5.89E-03	3.07E-03	1.25E-06	4.67E-05	1.68E-06	6.29E-05
6.36E-05	4.46E-06	2.91E-06	6.46E-05	2.48E-04	1.73E-05	1.13E-05	2.51E-04	1.30E-02	3.17E-03	6.92E-03	2.30E-03	1.74E-02	4.27E-03	9.32E-03	3.10E-03	3.85E-07	4.76E-05	5.19E-07	6.41E-05
7.78E-05	4.29E-06	1.24E-06	6.88E-05	3.03E-04	1.67E-05	4.83E-06	2.68E-04	1.58E-02	3.05E-03	2.95E-03	2.45E-03	2.13E-02	4.11E-03	3.97E-03	3.30E-03	4.71E-07	4.58E-05	6.34E-07	6.16E-05
9.48E-05	4.33E-06	4.20E-06	7.54E-05	3.69E-04	1.68E-05	1.63E-05	2.93E-04	1.93E-02	3.08E-03	9.97E-03	2.68E-03	2.60E-02	4.15E-03	1.34E-02	3.61E-03	5.74E-07	4.63E-05	7.72E-07	6.23E-05
8.74E-05	3.90E-06	9.43E-07	6.94E-05	3.40E-04	1.52E-05	3.67E-06	2.70E-04	1.78E-02	2.78E-03	2.24E-03	2.47E-03	2.40E-02	3.74E-03	3.01E-03	3.33E-03	5.29E-07	4.17E-05	7.13E-07	5.61E-05
2.02E-04	4.63E-06	1.89E-06	8.31E-05	7.86E-04	1.80E-05	7.33E-06	3.23E-04	4.11E-02	3.30E-03	4.48E-03	2.96E-03	5.53E-02	4.44E-03	6.03E-03	3.98E-03	1.22E-06	4.95E-05	1.65E-06	6.66E-05

**Suite de résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
8.23E-05	3.94E-06	2.79E-06	7.23E-05	3.20E-04	1.53E-05	1.08E-05	2.81E-04	1.67E-02	2.81E-03	6.61E-03	2.58E-03	2.25E-02	3.78E-03	8.90E-03	3.47E-03	4.98E-07	4.21E-05	6.71E-07	5.67E-05
2.27E-04	4.37E-06	1.54E-06	8.61E-05	8.84E-04	1.70E-05	6.00E-06	3.35E-04	4.62E-02	3.11E-03	3.66E-03	3.07E-03	6.22E-02	4.19E-03	4.93E-03	4.13E-03	1.38E-06	4.67E-05	1.85E-06	6.29E-05
8.28E-05	4.20E-06	1.41E-06	3.96E-05	3.22E-04	1.63E-05	5.50E-06	1.54E-04	1.69E-02	2.99E-03	3.36E-03	1.41E-03	2.27E-02	4.03E-03	4.52E-03	1.90E-03	5.01E-07	4.49E-05	6.75E-07	6.04E-05
5.79E-05	4.76E-06	1.97E-06	6.43E-05	2.25E-04	1.85E-05	7.67E-06	2.50E-04	1.18E-02	3.39E-03	4.68E-03	2.29E-03	1.59E-02	4.56E-03	6.30E-03	3.08E-03	3.50E-07	5.08E-05	4.72E-07	6.84E-05
7.98E-05	3.73E-06	1.54E-06	7.67E-05	3.11E-04	1.45E-05	6.00E-06	2.98E-04	1.62E-02	2.66E-03	3.66E-03	2.73E-03	2.19E-02	3.58E-03	4.93E-03	3.68E-03	4.83E-07	3.98E-05	6.51E-07	5.36E-05
1.87E-04	4.67E-06	3.43E-06	6.81E-05	7.27E-04	1.82E-05	1.33E-05	2.65E-04	3.80E-02	3.33E-03	8.14E-03	2.43E-03	5.12E-02	4.48E-03	1.10E-02	3.27E-03	1.13E-06	4.99E-05	1.52E-06	6.72E-05
2.06E-04	4.11E-06	7.29E-07	6.41E-05	8.02E-04	1.60E-05	2.83E-06	2.49E-04	4.19E-02	2.93E-03	1.73E-03	2.28E-03	5.65E-02	3.95E-03	2.33E-03	3.07E-03	1.25E-06	4.40E-05	1.68E-06	5.92E-05
2.25E-04	4.50E-06	2.31E-06	6.46E-05	8.74E-04	1.75E-05	9.00E-06	2.51E-04	4.57E-02	3.21E-03	5.50E-03	2.30E-03	6.16E-02	4.32E-03	7.40E-03	3.10E-03	1.36E-06	4.81E-05	1.83E-06	6.47E-05
8.49E-05	3.94E-06	1.84E-06	6.88E-05	3.30E-04	1.53E-05	7.17E-06	2.68E-04	1.73E-02	2.81E-03	4.38E-03	2.45E-03	2.32E-02	3.78E-03	5.89E-03	3.30E-03	5.14E-07	4.21E-05	6.92E-07	5.67E-05
8.16E-05	4.24E-06	9.86E-07	7.54E-05	3.18E-04	1.65E-05	3.83E-06	2.93E-04	1.66E-02	3.02E-03	2.34E-03	2.68E-03	2.24E-02	4.07E-03	3.15E-03	3.61E-03	4.94E-07	4.53E-05	6.65E-07	6.10E-05
8.63E-05	4.33E-06	2.14E-06	6.94E-05	3.36E-04	1.68E-05	8.33E-06	2.70E-04	1.76E-02	3.08E-03	5.09E-03	2.47E-03	2.36E-02	4.15E-03	6.85E-03	3.33E-03	5.22E-07	4.63E-05	7.03E-07	6.23E-05
6.84E-05	4.33E-06	1.76E-06	8.31E-05	2.66E-04	1.68E-05	6.83E-06	3.23E-04	1.39E-02	3.08E-03	4.17E-03	2.96E-03	1.87E-02	4.15E-03	5.62E-03	3.98E-03	4.14E-07	4.63E-05	5.58E-07	6.23E-05
9.28E-05	4.16E-06	1.37E-06	7.23E-05	3.61E-04	1.62E-05	5.33E-06	2.81E-04	1.89E-02	2.96E-03	3.26E-03	2.58E-03	2.54E-02	3.99E-03	4.38E-03	3.47E-03	5.62E-07	4.44E-05	7.57E-07	5.98E-05

**Suite de résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
1.87E-04	4.37E-06	2.40E-06	8.61E-05	7.28E-04	1.70E-05	9.33E-06	3.35E-04	3.81E-02	3.11E-03	5.70E-03	3.07E-03	5.13E-02	4.19E-03	7.67E-03	4.13E-03	1.13E-06	4.67E-05	1.53E-06	6.29E-05
8.46E-05	4.59E-06	1.76E-06	8.24E-05	3.29E-04	1.78E-05	6.83E-06	3.21E-04	1.72E-02	3.27E-03	4.17E-03	2.94E-03	2.32E-02	4.40E-03	5.62E-03	3.95E-03	5.12E-07	4.90E-05	6.90E-07	6.60E-05
7.20E-05	4.41E-06	1.41E-06	6.43E-05	2.80E-04	1.72E-05	5.50E-06	2.50E-04	1.47E-02	3.14E-03	3.36E-03	2.29E-03	1.97E-02	4.23E-03	4.52E-03	3.08E-03	4.36E-07	4.72E-05	5.87E-07	6.35E-05
1.54E-04	4.16E-06	9.00E-07	7.67E-05	6.00E-04	1.62E-05	3.50E-06	2.98E-04	3.14E-02	2.96E-03	2.14E-03	2.73E-03	4.22E-02	3.99E-03	2.88E-03	3.68E-03	9.33E-07	4.44E-05	1.26E-06	5.98E-05
8.69E-05	4.16E-06	4.20E-06	6.81E-05	3.38E-04	1.62E-05	1.63E-05	2.65E-04	1.77E-02	2.96E-03	9.97E-03	2.43E-03	2.38E-02	3.99E-03	1.34E-02	3.27E-03	5.26E-07	4.44E-05	7.08E-07	5.98E-05
6.99E-05	4.33E-06	3.81E-06	6.41E-05	2.72E-04	1.68E-05	1.48E-05	2.49E-04	1.42E-02	3.08E-03	9.06E-03	2.28E-03	1.92E-02	4.15E-03	1.22E-02	3.07E-03	4.23E-07	4.63E-05	5.70E-07	6.23E-05
1.60E-04	4.59E-06	9.00E-07	6.46E-05	6.21E-04	1.78E-05	3.50E-06	2.51E-04	3.25E-02	3.27E-03	2.14E-03	2.30E-03	4.37E-02	4.40E-03	2.88E-03	3.10E-03	9.66E-07	4.90E-05	1.30E-06	6.60E-05
1.95E-04	3.94E-06	1.37E-06	6.88E-05	7.60E-04	1.53E-05	5.33E-06	2.68E-04	3.98E-02	2.81E-03	3.26E-03	2.45E-03	5.35E-02	3.78E-03	4.38E-03	3.30E-03	1.18E-06	4.21E-05	1.59E-06	5.67E-05
9.28E-05	3.99E-06	2.70E-06	7.54E-05	3.61E-04	1.55E-05	1.05E-05	2.93E-04	1.89E-02	2.84E-03	6.41E-03	2.68E-03	2.54E-02	3.82E-03	8.63E-03	3.61E-03	5.62E-07	4.26E-05	7.57E-07	5.73E-05
7.56E-05	4.29E-06	2.31E-06	6.94E-05	2.94E-04	1.67E-05	9.00E-06	2.70E-04	1.54E-02	3.05E-03	5.50E-03	2.47E-03	2.07E-02	4.11E-03	7.40E-03	3.33E-03	4.58E-07	4.58E-05	6.16E-07	6.16E-05
8.23E-05	4.11E-06	3.73E-06	8.31E-05	3.20E-04	1.60E-05	1.45E-05	3.23E-04	1.67E-02	2.93E-03	8.85E-03	2.96E-03	2.25E-02	3.95E-03	1.19E-02	3.98E-03	4.98E-07	4.40E-05	6.71E-07	5.92E-05
8.34E-05	4.33E-06	1.37E-06	7.23E-05	3.25E-04	1.68E-05	5.33E-06	2.81E-04	1.70E-02	3.08E-03	3.26E-03	2.58E-03	2.29E-02	4.15E-03	4.38E-03	3.47E-03	5.05E-07	4.63E-05	6.80E-07	6.23E-05
6.42E-05	4.03E-06	9.86E-07	8.61E-05	2.50E-04	1.57E-05	3.83E-06	3.35E-04	1.31E-02	2.87E-03	2.34E-03	3.07E-03	1.76E-02	3.86E-03	3.15E-03	4.13E-03	3.88E-07	4.30E-05	5.23E-07	5.79E-05

**Suite de résultats bruts du calcul du risque non cancérigène et cancérigène lié à la consommation du lait de chamelle.**

EDI Adultes				EDI Enfants				THQ Adultes				THQ Enfants				CR Adultes		CR Enfants	
Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Hg	Ni	Pb	Cd	Pb	Cd
7.61E-05	4.11E-06	2.23E-06	8.24E-05	2.96E-04	1.60E-05	8.67E-06	3.21E-04	1.55E-02	2.93E-03	5.29E-03	2.94E-03	2.09E-02	3.95E-03	7.12E-03	3.95E-03	4.61E-07	4.40E-05	6.20E-07	5.92E-05
1.76E-04	3.60E-06	2.79E-06	6.43E-05	6.86E-04	1.40E-05	1.08E-05	2.50E-04	3.59E-02	2.56E-03	6.61E-03	2.29E-03	4.83E-02	3.45E-03	8.90E-03	3.08E-03	1.07E-06	3.85E-05	1.44E-06	5.18E-05
8.46E-05	4.54E-06	2.31E-06	7.67E-05	3.29E-04	1.77E-05	9.00E-06	2.98E-04	1.72E-02	3.24E-03	5.50E-03	2.73E-03	2.32E-02	4.36E-03	7.40E-03	3.68E-03	5.12E-07	4.85E-05	6.90E-07	6.53E-05
1.37E-04	4.07E-06	2.53E-06	6.81E-05	5.34E-04	1.58E-05	9.83E-06	2.65E-04	2.79E-02	2.90E-03	6.00E-03	2.43E-03	3.76E-02	3.90E-03	8.08E-03	3.27E-03	8.31E-07	4.35E-05	1.12E-06	5.86E-05
9.23E-05	4.20E-06	9.86E-07	6.41E-05	3.59E-04	1.63E-05	3.83E-06	2.49E-04	1.88E-02	2.99E-03	2.34E-03	2.28E-03	2.53E-02	4.03E-03	3.15E-03	3.07E-03	5.59E-07	4.49E-05	7.52E-07	6.04E-05
1.53E-04	3.56E-06	8.57E-07	6.46E-05	5.94E-04	1.38E-05	3.33E-06	2.51E-04	3.11E-02	2.53E-03	2.04E-03	2.30E-03	4.18E-02	3.41E-03	2.74E-03	3.10E-03	9.24E-07	3.80E-05	1.24E-06	5.12E-05



## Evaluation of toxic metal levels (Lead, Cadmium, Nickel) in raw camel milk in the northern Algerian Sahara (Biskra, El-Oued, Ouargla, Ghardaïa).

### **Abstract:**

**Introduction:** The consumption of camel milk is gaining popularity in Southern Algeria. This study aimed to determine the concentrations of Lead (Pb), Cadmium (Cd), Nickel (Ni), and Mercury (Hg) in raw camel milk sold in Southeast Algeria and assess the potential health risks associated with its consumption.

**Materials and Methods:** 120 samples were collected from ten farms located near the roads connecting the cities of Biskra to Ghardaïa, passing through the city of Ouargla. The collection period was divided into four campaigns throughout the year 2021. The metals were measured using an atomic absorption spectrophotometer with a graphite furnace (AAS-GF). From the obtained concentrations, the Hazard Quotient (HQ) and the Cancer Risk (CR) were calculated.

**Results and Discussion:** The mean concentrations were  $26.32 \pm 12.85 \mu\text{g/kg}$ ,  $0.95 \pm 0.17 \mu\text{g/kg}$ ,  $16.85 \pm 2.06 \mu\text{g/kg}$ , and  $0.50 \pm 0.18 \mu\text{g/kg}$  for Pb, Cd, Ni, and Hg, respectively. The average Pb concentration exceeded the internationally recommended levels ( $20 \mu\text{g/kg}$ ). The HQ and CR were higher for children, suggesting health risks associated with consumption for vulnerable groups ( $p < 0.001$ ). Metal analysis in environmental matrices revealed their influences ( $p < 0.05$ ) on milk quality. This suggests that anthropogenic activities lead to metal transfer from the environment to camels, particularly from the soil. Metals can accumulate and pose potential health risks to both animals and milk consumers.

**Conclusion:** The primary contribution of this study is the establishment of a database on toxic metal levels in camel milk. The results of this study can be valuable for policymakers in developing strategies to manage the risk associated with metals in milk.

**Keywords:** Camel milk; Quantification; Lead; Cadmium; Nickel; Mercury; Risk assessment.

## تقييم مستويات المعادن السامة (الرصاص الكاديوم، النيكل) في حليب الإبل في شمال الصحراء الجزائرية (بسكرة، الوادي، ورقلة، غرداية).

### ملخص

**المقدمة:** يشهد استهلاك حليب الإبل ارتفاعاً في جنوب الجزائر. هدفت هذه الدراسة إلى تحديد تراكيز الرصاص (Pb)، الكاديوم (Cd)، النيكل (Ni)، والزنك (Hg) في حليب الإبل الخام المباع في جنوب شرق الجزائر وتقييم المخاطر الصحية المحتملة المرتبطة بتناوله.

**طرق العمل:** جمعت 120 عينة من عشرة مزارع قريبة من الطرق التي تربط مدن بسكرة بغرداية عبر ورقلة. تم تقسيم فترة الجمع إلى أربع حملات خلال عام 2021. قيست المعادن باستخدام مطياف الامتصاص الذري بفرن الجرافيت (AAS-GF). حسبت من خلال التراكيز المحصل عليها، معامل الخطر (HQ) ومعدل الخطر السرطاني (CR).

**النتائج:** كانت التراكيز المتوسطة هي  $12.85 \pm 26.32$  ميكروغرام/كيلوغرام، و  $0.17 \pm 0.95$  ميكروغرام/كيلوغرام، و  $2.06 \pm 16.85$  ميكروغرام/كيلوغرام، و  $0.18 \pm 0.50$  ميكروغرام/كيلوغرام للرصاص والكاديوم والنيكل والزنك على التوالي. تجاوزت تراكيز الرصاص المتوسطة المستويات الموصى بها عالمياً (20 ميكروغرام/كيلوغرام). كانت HQ و CR أعلى للأطفال، مما يشير إلى وجود مخاطر صحية مرتبطة بتناوله للفئات الضعيفة ( $p < 0.001$ ). أظهر تحليل المعادن في المصادر البيئية تأثيراتها ( $p < 0.05$ ) على جودة الحليب. وهذا يشير إلى أن الأنشطة البشرية تؤدي إلى نقل المعادن من البيئة إلى الإبل، خاصة من التربة. يمكن أن تتراكم المعادن وتشكل مخاطر صحية محتملة للحيوانات ومستهلكي حليبها.

**الخاتمة:** المساهمة الرئيسية لهذه الدراسة هي إنشاء قاعدة بيانات حول مستويات المعادن الضارة في حليب الإبل. يمكن أن تكون نتائج هذه الدراسة مفيدة لصناع القرار في تطوير استراتيجيات لإدارة المخاطر المرتبطة بالمعادن في الحليب.

**الكلمات الرئيسية:** حليب الإبل؛ تحليل؛ رصاص؛ كاديوم؛ نيكل؛ زنك؛ تقييم المخاطر.



Nom et prénom : Mohamed Amine Kerdoun

Titre : **Évaluation des taux de métaux toxiques (Plomb, Cadmium, Nickel) dans le lait de chamelle cru au niveau du Sahara septentrional algérien (Biskra, El-Oued, Ouargla, Ghardaïa).**

Thèse en vue l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences Médicales en Toxicologie

## Résumé

**Introduction :** La consommation de lait de chamelle prend une place grandissante dans le Sud de l'Algérie. Cette étude visait à déterminer les concentrations du Plomb (Pb), du Cadmium (Cd), du Nickel (Ni) et du Mercure (Hg) dans le lait de chamelle cru vendu dans le Sud-Est de l'Algérie et à évaluer les risques potentiels pour la santé associés à sa consommation.

**Matériel et méthodes :** 120 échantillons ont été collectés de dix élevages se situant à proximité des routes qui relient les villes de Biskra à Ghardaïa en passant par la ville de Ouargla. La période de collecte s'est divisée en quatre campagnes au cours de l'année 2021. Les métaux ont été mesurés à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique avec un four à graphite (SAA-FG). À partir des concentrations obtenues, le quotient de danger (HQ) et le risque cancérigène (RC) ont été calculés.

**Résultats et Discussion :** Les concentrations moyennes étaient de  $26,32 \pm 12,85 \mu\text{g/Kg}$ ,  $0,95 \pm 0,17 \mu\text{g/Kg}$ ,  $16,85 \pm 2,06 \mu\text{g/Kg}$  et  $0,50 \pm 0,18 \mu\text{g/Kg}$  pour le Pb, le Cd, le Ni et le Hg respectivement. La concentration moyenne de Pb s'est avérée supérieure aux niveaux internationaux recommandés ( $20 \mu\text{g/Kg}$ ). Le HQ et le RC étaient plus importants pour les enfants, suggérant des risques sanitaires associés à la consommation pour les groupes vulnérables ( $p < 0,001$ ). L'analyse des métaux dans les matrices environnementales a permis de révéler leurs influences ( $p < 0,05$ ) sur la qualité du lait. Ceci suggère que les activités anthropiques conduisent à un transfert des métaux de l'environnement aux chammelles, notamment à partir du sol. Les métaux peuvent s'accumuler et causer des risques potentiels pour la santé des animaux et des consommateurs de lait.

**Conclusion :** La principale contribution de cette étude est l'établissement d'une base de données sur les niveaux de métaux toxiques dans le lait de chamelle. Les résultats de cette étude peuvent être utiles aux décideurs pour développer des stratégies visant à gérer le risque associé aux métaux dans le lait.

**Mots-clés :** Lait de chamelle ; Dosage ; Plomb ; Cadmium ; Nickel ; Mercure ; Evaluation des risques.

Directeur de thèse : Professeur DJAFER Rachid

Université BADJI Mokhtar Annaba