

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR - ANNABA
FACULTE DE MEDECINE**



THESE

Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Médicales

Discipline : Hydrologie-Bromatologie

**EVALUATION DES TENEURS EN ALUMINIUM DANS LE
LAIT INFANTILE ARTIFICIEL DESTINÉ AUX
NOURRISSONS DE MOINS D'UN AN**

Présentée par Dr : SEMOUD Anissa

Maitre-assistante Hospitalo-Universitaire en Hydrologie-Bromatologie

Directrice de Thèse : Pr HADJOU DJ Ouahiba Faculté de Pharmacie d'Alger

Co-Directeur de Thèse : Pr HADEF Youcef Faculté de Médecine d'Annaba

Le Jury :

| | | |
|--------------------------------|------------------|-------------------------------------------|
| Pr MERAH Abdelali | Président | Faculté de Médecine d'Annaba |
| Pr GAOUAR Zakaria Lotfi | Membre | Faculté de Médecine d'Oran |
| Pr LALAOUNA Abdeldjalil | Membre | Faculté de Médecine de Constantine |
| Pr GUELLATI Ouafa | Membre | Faculté de Médecine d'Annaba |
| Pr BOUSTIL Ahmed Lotfi | Membre | Faculté de Médecine d'Annaba |

N° d'ordre :.....

Année : 2024/2025

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR - ANNABA
FACULTE DE MEDECINE



THESE

Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Médicales
Discipline : Hydrologie-Bromatologie

**EVALUATION DES TENEURS EN ALUMINIUM DANS LE
LAIT INFANTILE ARTIFICIEL DESTINÉ AUX
NOURRISSONS DE MOINS D'UN AN**

Présentée par Dr : SEMOUD Anissa

Maitre-assistante Hospitalo-Universitaire en Hydrologie-Bromatologie

Directrice de Thèse : Pr HADJOU DJ Ouahiba Faculté de Pharmacie d'Alger

Co-Directeur de Thèse : Pr HADEF Youcef Faculté de Médecine d'Annaba

Le Jury :

| | | |
|-------------------------|-----------|------------------------------------|
| Pr MERAH Abdelali | Président | Faculté de Médecine d'Annaba |
| Pr GAOUAR Zakaria Lotfi | Membre | Faculté de Médecine d'Oran |
| Pr LALAOUNA Abdeldjalil | Membre | Faculté de Médecine de Constantine |
| Pr GUELLATI Ouafa | Membre | Faculté de Médecine d'Annaba |
| Pr BOUSTIL Ahmed Lotfi | Membre | Faculté de Médecine d'Annaba |

N° d'ordre :

Année : 2024/2025

DEDICACE

A mon cher papa, parti trop tôt avant de voir l'aboutissement de ce travail. Tu as toujours cru en moi, m'encourageant à persévérer, et c'est grâce à toi que je suis arrivée là aujourd'hui. Cette thèse est le fruit de tes valeurs et de ton amour, et je te le dédie avec une immense gratitude et une pensée profonde.

A ma maman, que Dieu la garde, pour son amour inconditionnel, sa patience et son soutien sans faille tout au long de mon parcours.

A ma famille, qui a toujours été présente à mes côtés, me portant dans les moments de doute et de fatigue. Un grand merci à mes sœurs, Imen, Zina, Khaoula et mon frère Youcef pour leur affection et leur encouragement indéfectible.

A mon époux, dont la patience, le soutien et la compréhension m'ont permis d'avancer sereinement dans cette aventure exigeante.

A mes précieux enfants, Yahia, Assil, Ilyes et ma petite Chahd, qui ont été ma plus grande source de motivation. Votre amour et votre présence m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout.

Cette thèse est le reflet de tout l'amour, la bienveillance et le soutien que j'ai reçus de vous tous. Merci du fond du cœur.

REMERCIEMENTS

Avant tout, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame le **Pr HADJOU DJ Ouahiba**, Directrice de cette thèse, pour son encadrement, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de cette étude. Son soutien et ses encouragements ont été d'une grande importance pour l'aboutissement de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur le **Pr HADEF Youcef**, Co-directeur de cette thèse, pour son aide précieuse, ses orientations judicieuses et ses remarques pertinentes qui ont contribué à l'aboutissement et à l'amélioration de ce travail.

Je remercie chaleureusement les membres du jury :

- **Pr MERAH Abdelali**, Président du jury, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'évaluer ce travail et pour l'intérêt qu'il lui porte.
- **Pr GAOUAR Lotfi Zakaria**, pour sa participation à l'évaluation de cette thèse et ses observations enrichissantes.
- **Pr LALAOUNA Abdeldjalil**, pour le temps consacré à l'analyse de ce travail et pour ses précieux conseils.
- **Pr BOUSTIL Ahmed Lotfi**, dont l'expertise en pédiatrie apporte un éclairage essentiel à cette étude.
- **Pr GUELLATI Ouafa**, pour l'attention portée à ce travail, ses remarques pertinentes et ses précieux conseils qui ont enrichi cette recherche.

Je leur exprime toute ma gratitude pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de cette thèse, ainsi que pour leurs observations et suggestions qui ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement les chercheurs et techniciens du laboratoire de l'ORGM-Boumerdes pour leur collaboration précieuse lors des analyses effectuées. Je n'oublie pas d'adresser mes sincères remerciements à **M^{me} HEIMER Zineb**, responsable du laboratoire de l'Algérienne des eaux, ainsi qu'aux responsables et personnels des EPSP Annaba, Berrahel et El Hadjar, particulièrement **Dr AYAT BENDIB Karima** et **Dr BENCHIKH.A**, pour leur aide précieuse dans la réalisation de cette étude.

Enfin, mes pensées vont à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail. A vous tous, je vous exprime ma profonde reconnaissance.

TABLE DES MATIERES

| | |
|------------------------------|-----|
| Liste des tableaux | I |
| Liste des figures | V |
| Liste des abréviations | IX |
| Liste des annexes | XII |
| INTRODUCTION | 1 |

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I. Aluminium et Toxicité

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Nature et propriétés de l'aluminium | 4 |
| 1.1. Historique de l'utilisation de l'aluminium | 4 |
| 1.2. Description de l'aluminium | 4 |
| 2. Propriétés physico-chimiques de l'aluminium | 5 |
| 3. Sources d'exposition à l'aluminium | 7 |
| 3.1. Air | 7 |
| 3.2. Eau | 7 |
| 3.3. Aliments | 7 |
| 3.3.1. Boissons | 7 |
| 3.3.2. Fruits et légumes | 8 |
| 3.3.3. Produits d'origine animale | 8 |
| 3.3.4. Poissons et autres produits de la mer | 8 |
| 3.4. Additifs alimentaires | 9 |
| 3.5. Formules pour nourrissons | 10 |
| 3.6. Matériaux en contact alimentaire | 11 |
| 3.7. Produits pharmaceutiques | 12 |
| 3.8. Produits cosmétiques | 12 |
| 4. Métabolisme de l'aluminium dans l'organisme | 13 |
| 4.1. Absorption et biodisponibilité | 13 |
| 4.1.1. Facteurs influençant l'absorption de l'aluminium | 13 |
| 4.1.2. Mécanismes d'absorption | 14 |
| 4.1.3. Autres voies d'absorption | 14 |
| 4.2. Distribution | 15 |
| 4.3. Métabolisme et élimination | 16 |
| 4.4. Spécificités du métabolisme chez les nourrissons | 18 |
| 5. Toxicité et effets de l'aluminium sur la santé | 19 |
| 5.1. Mécanismes de toxicité | 19 |
| 5.1.1. Neurotoxicité | 19 |
| 5.1.2. Développement du stress oxydatif chronique | 21 |
| 5.2. Effets pathologiques associés à l'exposition à l'aluminium | 21 |
| 5.2.1. Trouble du Spectre Autistique | 21 |
| 5.2.2. Maladie d'Alzheimer | 22 |
| 5.2.3. Sclérose en plaque | 23 |

| | | |
|---------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.4. | Maladie de Parkinson (MP)..... | 23 |
| 5.2.5. | Encéphalopathie de dialyse | 23 |
| 5.2.6. | Malformations congénitales | 24 |
| 5.2.7. | Démence..... | 24 |
| 5.2.8. | Cancer du sein | 25 |
| 5.2.9. | Os/cartilage..... | 25 |
| 5.2.10. | Maladies inflammatoires de l'intestin | 25 |
| 6. | Méthodes de dosage de l'aluminium | 28 |
| 6.1. | Spectrométrie d'absorption atomique | 28 |
| 6.1.1. | Spectrométrie d'absorption atomique par flamme | 28 |
| 6.1.2. | Spectrométrie d'absorption atomique électrothermique | 28 |
| 6.2. | Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) | 29 |
| 6.3. | Microsonde laser couplée à la spectrométrie de masse (LMMS ou LAMMA) | 29 |
| 6.4. | Activation neutronique (INAA)..... | 29 |
| 6.5. | Méthodes de spectrophotométrie UV-Visible | 29 |
| 6.5.1. | Méthode spectrophotométrique avec l'Eriochrome Cyanine R | 29 |
| 6.5.2. | Méthode spectrophotométrique au rouge d'alizarine S..... | 29 |
| 7. | Apports en aluminium selon l'âge et valeurs limites d'exposition..... | 31 |
| 7.1. | Adultes et ingestion d'aluminium..... | 31 |
| 7.2. | Enfants et ingestion d'aluminium..... | 31 |
| 7.3. | Valeurs limites d'exposition | 31 |

CHAPITRE II. Alimentation Infantile

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Historique des préparations pour nourrissons | 33 |
| 2. | Définitions..... | 35 |
| 2.1. | Préparation destinée aux nourrissons | 35 |
| 2.2. | Nourrisson | 35 |
| 2.3. | Lait maternel..... | 35 |
| 2.4. | Transition alimentaire..... | 35 |
| 2.5. | Besoins nutritionnels | 35 |
| 2.5.1. | Besoins énergétiques | 35 |
| 2.5.2. | Apports nutritionnels recommandés..... | 36 |
| 3. | Les différents régimes d'alimentation infantile et leurs impacts sur la santé | 38 |
| 3.1. | Régimes d'allaitement infantile | 38 |
| 3.1.1. | Allaitement maternel exclusif | 38 |
| 3.1.2. | Allaitement maternel prédominant..... | 38 |
| 3.1.3. | Allaitement partiel ou alimentation complémentaire | 38 |
| 3.1.4. | Alimentation au biberon..... | 38 |
| 3.2. | Bienfaits de l'allaitement maternel..... | 38 |
| 3.3. | Facteurs influençant la décision d'allaitement artificiel..... | 39 |
| 3.4. | Comparaison entre la composition du lait maternel et celle des PPN | 39 |
| 4. | Classification, usages et particularités des préparations infantiles | 40 |
| 4.1. | Formules standards à base de lait de vache pour nourrissons à terme..... | 41 |
| 4.1.1. | Préparation initiale pour nourrissons ou lait initial (1 ^{er} âge)..... | 41 |

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.2. | Lait de suite (2 ^{ème} âge) | 41 |
| 4.1.3. | Formules de croissance (3 ^{ème} âge)..... | 41 |
| 4.2. | Formules pour nourrissons à terme en cas de signes et symptômes d'intolérance.... | 41 |
| 4.2.1. | Lait hypoallergénique « HA » | 41 |
| 4.2.2. | Lait à base de protéines de Soja | 41 |
| 4.2.3. | Formules pour coliques et troubles digestifs..... | 41 |
| 4.2.4. | Formules sans lactose..... | 42 |
| 4.2.5. | Formules pour reflux gastro-œsophagien | 42 |
| 4.3. | Autres formules spécialisées | 42 |
| 4.3.1. | Formules pour prématurés..... | 42 |
| 4.3.2. | Formules à base d'acides aminés | 42 |
| 4.3.3. | Formules réduites en minéraux | 42 |
| 5. | Composition, fabrication et réglementation des préparations pour nourrissons..... | 42 |
| 5.1. | Ingrédients | 42 |
| 5.2. | Processus de fabrication | 44 |
| 5.2.1. | Procédé de mélange sec..... | 44 |
| 5.2.2. | Procédé de mélange humide..... | 44 |
| 5.3. | Conditionnement et réglementation..... | 46 |
| 5.3.1. | Les exigences d'étiquetage..... | 46 |
| 5.3.2. | Interdictions d'étiquetage..... | 46 |
| 6. | Risques de contaminations microbiologique et chimique des PPN..... | 46 |
| 6.1. | Contaminants microbiologiques | 46 |
| 6.1.1. | Effets des microorganismes sur la santé du nourrisson..... | 46 |
| 6.1.2. | Sources de contamination des préparations pour nourrissons..... | 47 |
| 6.1.3. | Principales bactéries incriminées | 47 |
| 6.1.4. | Nourrissons à risque | 48 |
| 6.2. | Contaminants chimiques..... | 48 |
| 6.2.1. | Sources de contamination du lait artificiel..... | 48 |
| 6.2.2. | Principaux contaminants chimiques du lait..... | 49 |
| 7. | Recommandations et pratiques pour la préparation et la conservation des PPN | 50 |
| 7.1. | Utilisation de l'eau | 50 |
| 7.2. | Qualité de l'eau pour la préparation des laits infantiles | 51 |
| 7.3. | Procédure de préparation | 51 |
| 7.4. | Conservation des biberons préparés | 52 |
| 7.5. | Sterilisation des biberons et des tétines | 52 |
| 8. | Etat des lieux et initiatives locales de la production de lait infantile en Algérie | 53 |

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE I. Enquête sur l'allaitement infantile dans la wilaya d'Annaba

| | | |
|--------|--------------------------------------|----|
| 1. | Matériel et méthodes..... | 54 |
| 1.1. | Cadre de l'étude..... | 54 |
| 1.1.1. | Localisation de la zone d'étude..... | 54 |
| 1.1.2. | Type d'étude..... | 55 |
| 1.1.3. | Période d'enquête..... | 55 |

| | | |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1.4. | Population cible..... | 55 |
| 1.1.5. | Taille de la population..... | 55 |
| 1.1.6. | Sélection des participantes | 56 |
| 1.2. | Méthodologie d'enquête | 58 |
| 1.2.1. | Elaboration du questionnaire..... | 58 |
| 1.2.2. | Contenu du questionnaire..... | 59 |
| 1.2.3. | Administration du questionnaire | 59 |
| 1.2.4. | Critères d'inclusion et d'exclusion..... | 59 |
| 1.3. | Traitement statistique | 60 |
| 1.3.1. | Outils statistiques | 60 |
| 1.3.2. | Modélisation statistique..... | 60 |
| 2. | Résultats..... | 62 |
| 2.1. | Caractéristiques générales de la population enquêtée | 62 |
| 2.1.1. | Répartition par EPSP..... | 62 |
| 2.1.2. | Répartition selon la commune..... | 62 |
| 2.1.3. | Répartition selon l'âge des mères..... | 63 |
| 2.1.4. | Répartition selon le profil sociodémographique et professionnel des mères | 64 |
| 2.1.5. | Statut tabagique | 65 |
| 2.1.6. | Parité et nombre d'enfants..... | 65 |
| 2.1.7. | Type d'allaitement de la fratrie | 66 |
| 2.1.8. | Age gestationnel et mode d'accouchement | 66 |
| 2.2. | Caractéristiques des nourrissons..... | 67 |
| 2.2.1. | Sexe et âge des nourrissons | 67 |
| 2.2.2. | Distribution pondérale des nourrissons à la naissance | 68 |
| 2.2.3. | Souffrance fœtale et statut staturo-pondéral actuel | 68 |
| 2.3. | Modalités d'allaitement | 70 |
| 2.3.1. | Type d'allaitement actuel | 70 |
| 2.3.2. | Motivations des mères pour le choix de l'allaitement maternel..... | 71 |
| 2.3.3. | Période de prise de décision pour l'allaitement maternel et moment de mise au sein | 72 |
| 2.3.4. | Motivations pour le choix de l'allaitement artificiel..... | 73 |
| 2.3.5. | Période de prise de décision pour l'allaitement artificiel..... | 73 |
| 2.4. | Pratiques alimentaires et choix des mères | 74 |
| 2.4.1. | Répartition des marques de lait infantile utilisées par les mères interrogées..... | 74 |
| 2.4.2. | Pratiques liées à la fréquence des biberons, à la réutilisation et au choix de l'eau utilisée | 75 |
| 2.4.3. | Evolution des volumes de lait administrés selon l'âge des nourrissons..... | 76 |
| 2.4.4. | Pratiques de chauffage de l'eau : préférences des mères et types de casseroles utilisées | 77 |
| 2.5. | Diversification alimentaire et antécédents médicaux des nourrissons | 78 |
| 2.5.1. | Age de début et modalités de la diversification alimentaire | 78 |
| 2.5.2. | Antécédents médicaux des nourrissons..... | 79 |
| 2.6. | Répartition des nourrissons selon le statut vaccinal et le nombre de vaccins en retard | 79 |

| | | |
|------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7. | Analyse des facteurs influençant le choix de l'allaitement | 80 |
| 3. | Discussion | 86 |
| 3.1. | Déterminants socioprofessionnels et culturels du choix d'allaitement | 86 |
| 3.2. | Pratiques alimentaires : usages, dérives et risques sanitaires | 89 |
| 3.3. | Diversification alimentaire, santé néonatale et couverture vaccinale..... | 91 |
| 4. | Conclusion | 91 |

CHAPITRE II. Evaluation de l'aluminium, des contaminants métalliques et des minéraux nutritionnels dans les préparations pour nourrissons et le lait maternel

| | | |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. | Matériels et méthodes | 93 |
| 1.1. | Type de l'étude | 93 |
| 1.2. | Matériel de laboratoire..... | 93 |
| 1.2.1. | Verrerie..... | 93 |
| 1.2.2. | Equipements | 93 |
| 1.2.3. | Réactifs..... | 93 |
| 1.2.4. | Autres consommables | 93 |
| 1.3. | Types d'échantillons analysés | 93 |
| 1.3.1. | Préparations pour nourrissons | 93 |
| 1.3.2. | Lait maternel | 96 |
| 1.4. | Méthodes | 97 |
| 1.4.1. | Digestion des échantillons de lait..... | 97 |
| 1.4.2. | Dosage de l'aluminium et des autres métaux..... | 100 |
| 1.5. | Critères d'évaluation et analyse des données | 103 |
| 1.5.1. | Conversion des unités..... | 103 |
| 1.5.2. | Evaluation des teneurs en aluminium..... | 104 |
| 1.5.3. | Comparaison des teneurs en métaux toxiques et minéraux essentiels | 106 |
| 1.6. | Analyse statistique | 108 |
| 1.6.1. | Vérification de la normalité des données | 108 |
| 1.6.2. | Tests appliqués en fonction des conditions statistiques | 108 |
| 1.6.3. | Comparaisons post-hoc | 108 |
| 1.6.4. | Seuil de signification..... | 109 |
| 2. | Résultats | 110 |
| 2.1. | Propriétés et caractéristiques des échantillons analysés | 110 |
| 2.1.1. | Identification et origine des formules infantiles analysées | 110 |
| 2.1.2. | Classification des préparations pour nourrissons | 112 |
| 2.1.3. | Caractéristiques des mères donneuses de lait maternel et de leurs nourrissons | 113 |
| 2.2. | Résultats de la détermination de l'Aluminium | 115 |
| 2.2.1. | Teneurs moyennes en aluminium dans les échantillons analysés | 115 |
| 2.2.2. | Comparaison des teneurs en aluminium dans les PPN | 115 |
| 2.2.3. | Evaluation des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) d'Aluminium chez les nourrissons | 133 |
| 2.3. | Teneurs en métaux toxiques | 138 |
| 2.3.1. | Concentrations des métaux toxiques dans les PPN..... | 138 |
| 2.3.2. | Concentrations des métaux toxiques dans le lait maternel..... | 139 |

| | | |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.3.3. | Comparaison des concentrations en métaux toxiques entre le lait maternel et les PPN | 140 |
| 2.3.4. | Conformité des concentrations aux normes réglementaires..... | 141 |
| 2.4. | Teneurs en minéraux d'intérêt nutritionnel | 142 |
| 2.4.1. | Teneurs dans les PPN | 142 |
| 2.4.2. | Teneurs dans le lait maternel..... | 143 |
| 2.4.3. | Analyse comparative des concentrations en minéraux d'intérêt nutritionnel entre le lait maternel et les laits standards de 1 ^{er} âge | 145 |
| 2.4.4. | Comparaison aux normes | 146 |
| 3. | Discussion | 150 |
| 3.1. | Caractéristiques des échantillons analysés | 150 |
| 3.2. | Analyse comparative des concentrations en aluminium dans les préparations infantiles et le lait maternel | 153 |
| 3.2.1. | Comparaison des teneurs en aluminium dans les PPN | 153 |
| 3.2.2. | Comparaison des concentrations en aluminium entre le lait maternel et les préparations infantiles standards de 1 ^{er} âge | 156 |
| 3.2.3. | Comparaison des concentrations en aluminium selon l'étape d'alimentation des préparations pour nourrissons | 157 |
| 3.2.4. | Comparaison des concentrations en aluminium selon le fabricant | 158 |
| 3.2.5. | Estimation des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) d'aluminium chez les nourrissons nourris aux PPN..... | 159 |
| 3.2.6. | Estimation des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) d'aluminium chez les nourrissons allaités au sein..... | 160 |
| 3.3. | Analyse comparative des métaux toxiques dans les préparations pour nourrissons et le lait maternel | 161 |
| 3.4. | Teneurs en minéraux d'intérêt nutritionnel | 165 |
| 4. | Conclusion | 167 |

CHAPITRE III. Développement, optimisation et validation d'une méthode spectrophotométrique pour la quantification de l'aluminium dans les eaux de consommation

| | | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. | Matériels et méthodes | 169 |
| 1.1. | Choix de la méthode et des échantillons | 169 |
| 1.1.1. | Principe de la méthode | 169 |
| 1.1.2. | Sélection des eaux à analyser | 170 |
| 1.2. | Matériel de laboratoire..... | 170 |
| 1.2.1. | Verrerie..... | 170 |
| 1.2.2. | Equipements | 170 |
| 1.2.3. | Réactifs..... | 170 |
| 1.3. | Caractéristiques des eaux analysées | 171 |
| 1.3.1. | Eau du robinet | 171 |
| 1.3.2. | Eaux conditionnées en bouteille..... | 172 |
| 2. | Application des plans d'expériences dans l'optimisation de la méthode..... | 173 |
| 2.1. | Criblage des facteurs | 174 |

| | | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1.1. | Sélection des facteurs expérimentaux | 174 |
| 2.1.2. | Domaine expérimental et définition des niveaux | 175 |
| 2.1.3. | Résultats et discussion..... | 178 |
| 2.2. | Plan composite central..... | 183 |
| 2.2.1. | Facteurs étudiés et domaine expérimental..... | 183 |
| 2.2.2. | Plan d'expérimentation | 184 |
| 2.2.3. | Modélisation mathématique | 185 |
| 2.2.4. | Analyse de la variance..... | 185 |
| 2.2.5. | Ajustement du modèle..... | 186 |
| 2.2.6. | Estimation des coefficients et statistiques des facteurs | 186 |
| 2.2.7. | Equations finales | 187 |
| 2.2.8. | Représentations graphiques et résidus..... | 188 |
| 2.2.9. | Optimisation | 192 |
| 2.2.10. | Confirmation expérimentale des conditions optimales | 194 |
| 3. | Validation de la méthode d'analyse | 195 |
| 3.1. | Interférences | 201 |
| 3.2. | Contrôle de l'étalonnage..... | 202 |
| 3.3. | Résultats de la validation de la méthode | 203 |
| 3.3.1. | Standards d'étalonnage (sans matrice)..... | 203 |
| 3.3.2. | Standards de validation (avec matrice) | 203 |
| 3.3.3. | Analyse de la fonction de réponse (gamme d'étalonnage)..... | 205 |
| 3.3.4. | Analyse de la fonction de réponse (gamme de validation) | 208 |
| 3.3.5. | Prédiction inverse des concentrations | 211 |
| 3.3.6. | Etablissement du profil d'exactitude..... | 213 |
| 3.3.7. | Estimation de l'incertitude | 214 |
| 3.3.8. | Evaluation de la linéarité de la méthode | 215 |
| 3.3.9. | Contrôle de l'étalonnage | 216 |
| 4. | Dosage de l'aluminium et Calcul de la Dose Hebdomadaire Ingérée (DHI) issue de l'eau | 216 |
| 4.1. | Méthodologie..... | 216 |
| 4.2. | Critères d'évaluation..... | 217 |
| 4.3. | Analyse des données..... | 217 |
| 5. | Résultats | 218 |
| 5.1. | Caractéristiques des échantillons étudiés | 218 |
| 5.1.1. | Répartition selon le type de l'eau | 218 |
| 5.1.2. | Caractéristiques des eaux en bouteille..... | 218 |
| 5.1.3. | Caractéristiques des eaux du robinet..... | 220 |
| 5.2. | Résultats du dosage de l'aluminium..... | 221 |
| 5.2.1 | Comparaison des taux d'aluminium entre les eaux conditionnées et les eaux du robinet | 222 |
| 5.2.2. | Comparaison des concentrations en aluminium entre les eaux de source et les eaux minérales..... | 226 |
| 5.2.3. | Analyse descriptive des concentrations en aluminium selon l'origine géographique (bassins hydrographiques)..... | 229 |

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.4. | Analyse descriptive des concentrations en aluminium dans l'eau du robinet selon l'origine | 230 |
| 5.2.5. | Comparaison des résultats en aluminium retrouvés avec les normes | 232 |
| 5.3. | Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) d'aluminium via l'eau | 232 |
| 6. | Discussion | 233 |
| 6.1. | Développement analytique | 233 |
| 6.2. | Caractéristiques des échantillons | 235 |
| 6.3. | Résultats du dosage de l'aluminium | 235 |
| 6.4. | Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) | 237 |
| 7. | Conclusion | 237 |

CHAPITRE IV. Étude du relargage et analyse chimométrique de l'aluminium et des paramètres physico-chimiques de l'eau

| | | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. | Matériel et méthodes | 238 |
| 1.1. | Matériel | 238 |
| 1.2. | Méthodes | 239 |
| 1.2.1. | Etude du relargage de l'aluminium | 239 |
| 1.2.2. | Déterminations physico-chimiques | 239 |
| 1.2.3. | Approche chimométrique | 240 |
| 1.2.4. | Analyses statistiques préliminaires | 241 |
| 1.3. | Critères d'évaluation | 243 |
| 1.4. | Traitement statistique et logiciels utilisés | 244 |
| 2. | Résultats | 245 |
| 2.1. | Etude du relargage de l'aluminium | 245 |
| 2.1.1. | Eau du robinet | 245 |
| 2.1.2. | Eau minérale | 248 |
| 2.1.3. | Eau de source | 252 |
| 2.1.4. | Comparaison du relargage de l'aluminium dans les trois casseroles entre l'eau conditionnée et celle du robinet | 255 |
| 2.2. | Résultats de l'analyse physico-chimique | 264 |
| 2.2.1. | Eaux minérales | 264 |
| 2.2.2. | Eaux de source | 265 |
| 2.2.3. | Eaux du robinet | 266 |
| 2.3. | Evaluation de l'adéquation des eaux aux recommandations pour la préparation des biberons | 267 |
| 2.3.1. | Eaux du robinet | 268 |
| 2.3.2. | Eaux de source | 270 |
| 2.4. | Etude chimométrique | 271 |
| 2.4.1. | Validation statistique de l'ACP (KMO et Bartlett) | 271 |
| 2.4.2. | Test de normalité | 271 |
| 2.4.3. | Analyse des corrélations entre les variables | 272 |
| 2.4.4. | Analyse par régression linéaire multiple | 273 |
| 2.4.5. | Distribution de l'inertie | 275 |
| 2.4.6. | Description des plans factoriels | 278 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.4.7. Résultat de l'ACH | 284 |
| 3. Discussion | 286 |
| 3.1. Etude du relargage de l'aluminium | 286 |
| 3.2. Résultats de l'analyse physicochimique | 287 |
| 3.3. Adéquation des eaux aux recommandations pour la préparation des biberons | 288 |
| 3.4. Analyse chimométrique | 289 |
| 4. Conclusion | 292 |
| CONCLUSION | 293 |

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

RESUME

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1. Propriétés physico-chimiques de l'aluminium et de ses composés | 6 |
| Tableau 2. Teneur moyenne en aluminium dans certains groupes alimentaires | 9 |
| Tableau 3. Liste des additifs alimentaires à base d'Aluminium et leurs limites maximales dans les produits finis selon la réglementation Algérienne | 10 |
| Tableau 4. Concentration d'aluminium dans certains produits cosmétiques | 12 |
| Tableau 5. Facteurs influençant l'absorption gastro-intestinale de l'aluminium | 14 |
| Tableau 6. Spécificités des processus d'absorption, distribution, métabolisme et excrétion chez les nouveau-nés, nourrissons et les prématurés | 18 |
| Tableau 7. Exposition à l'Al et santé humaine : quelques preuves épidémiologiques | 26 |
| Tableau 8. Synthèse des principales méthodes utilisées pour le dosage de l'aluminium | 30 |
| Tableau 9. Apports nutritionnels pour les nourrissons entre 0 et 12 mois | 36 |
| Tableau 10. Comparaison de la composition du lait maternel et des préparations pour nourrissons | 40 |
| Tableau 11. Principaux ingrédients des préparations pour nourrissons | 43 |
| Tableau 12. Teneurs en contaminants chimiques dans le lait maternel et les laits infantiles de 1 ^{er} âge | 50 |
| Tableau 13. Résumé des recommandations pour la préparation des formules pour nourrissons | 51 |
| Tableau 14. Recommandations d'alimentation au biberon en fonction de l'âge du nourrisson | 52 |
| Tableau 15. Population résidente des ménages ordinaires et collectifs (MOC) selon la commune de résidence en fin 2019 | 57 |
| Tableau 16. Caractéristiques sociodémographiques et professionnelles | 64 |
| Tableau 17. Répartition selon la parité et le nombre d'enfants..... | 65 |
| Tableau 18. Répartition des nourrissons selon la présence d'une souffrance fœtale..... | 68 |
| Tableau 19. Age d'introduction du lait de vache | 70 |
| Tableau 20. Répartition des mères selon les motivations déclarées en faveur de l'allaitement maternel..... | 71 |
| Tableau 21. Moment de la première mise au sein après l'accouchement..... | 72 |
| Tableau 22. Raisons du choix de l'allaitement artificiel..... | 73 |
| Tableau 23. Nombre de biberons consommés par jour et type d'eau utilisée..... | 75 |
| Tableau 24. Modes de chauffage de l'eau et types d'ustensiles utilisés | 77 |
| Tableau 25. Répartition des nourrissons selon l'introduction et l'âge de diversification alimentaire..... | 78 |
| Tableau 26. Pathologies observées chez les nourrissons dans les premiers jours de vie..... | 79 |
| Tableau 27. Critères d'ajustement et tests de vraisemblance du modèle logistique | 80 |
| Tableau 28. Indicateurs de qualité d'ajustement du modèle logistique selon le pseudo R ² | 80 |
| Tableau 29. Facteurs prédictifs du type de l'allaitement | 81 |
| Tableau 30. Tableau récapitulatif des Odds Ratios significatifs..... | 83 |
| Tableau 31. Variables non significativement associées au type d'allaitement – Résultats du modèle logistique | 84 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 32. Paramètres analytiques pour la détection des métaux lourds toxiques par spectrométrie d'absorption atomique | 102 |
| Tableau 33. Paramètres analytiques pour la détermination des minéraux essentiels par spectrométrie d'émission atomique..... | 103 |
| Tableau 34. Recommandations sur la préparation et la fréquence des biberons selon l'âge du nourrisson | 104 |
| Tableau 35. Quantité moyenne de lait maternel consommée par jour selon l'âge du nourrisson | 105 |
| Tableau 36. Poids moyen des nourrissons selon l'âge et le sexe | 105 |
| Tableau 37. Normes algériennes relatives aux métaux dans les PPN | 106 |
| Tableau 38. Normes européenne relatives aux préparations pour nourrissons à base de protéines ou d'hydrolysats de protéines de lait de vache ou de lait de chèvre | 107 |
| Tableau 39. Normes pour les préparations pour nourrissons à base d'isolats de protéines de soja, seuls ou mélangés avec des protéines de lait | 107 |
| Tableau 40. Normes pour les préparations de suite à base de protéines de lait de vache ou de chèvre | 107 |
| Tableau 41. Normes pour les préparations de suite à base d'isolats de protéines de soja | 107 |
| Tableau 42. Tests statistiques selon la normalité et l'homogénéité des variances..... | 108 |
| Tableau 43. Tests post-hoc selon la situation statistique | 108 |
| Tableau 44. Répartition des préparations infantiles par fabricant..... | 110 |
| Tableau 45. Caractéristiques démographiques et biologiques des mères donneuses et de leurs nourrissons | 113 |
| Tableau 46. Concentrations moyennes en Al dans les PPN et le lait maternel..... | 115 |
| Tableau 47. Moyennes et écarts types des concentrations en aluminium selon la marque... | 116 |
| Tableau 48. Résultats du test Kruskal-Wallis | 116 |
| Tableau 49. Comparaisons significatives des concentrations en aluminium entre les marques de préparations pour nourrissons (test post-hoc de Dunn-Bonferroni) | 118 |
| Tableau 50. Moyennes et écarts types des concentrations en Al selon la classe de PPN | 120 |
| Tableau 51. Résultats des tests de normalité des teneurs en Al selon la catégorie de PPN .. | 120 |
| Tableau 52. Résultats du test de Kruskal-Wallis appliqué aux catégories de lait infantile .. | 121 |
| Tableau 53. Comparaisons post-hoc des concentrations en aluminium entre les catégories de lait infantile (correction de Bonferroni) | 122 |
| Tableau 54. Résultats des tests de normalité appliqués aux concentrations en aluminium dans le lait maternel et les laits standards de 1 ^{er} âge | 125 |
| Tableau 55. Résultats du test t de Student comparant les concentrations en aluminium entre le lait maternel et les laits infantiles standards de 1 ^{er} âge | 125 |
| Tableau 56. Estimation des tailles d'effet pour la comparaison entre le lait maternel et les laits standards de 1 ^{er} âge | 126 |
| Tableau 57. Moyennes et écarts types des teneurs en Al selon l'étape d'alimentation | 126 |
| Tableau 58. Résultats des tests de normalité selon l'étape du lait | 127 |
| Tableau 59. Résultats du test de Levene | 127 |
| Tableau 60. Statistiques descriptives des teneurs en Al selon l'étape d'alimentation | 128 |
| Tableau 61. Résultats de l'ANOVA de Welch | 129 |
| Tableau 62. Résultats du test de normalité selon le fabricant | 129 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 63. Résultats du test de Kruskal-Wallis | 130 |
| Tableau 64. Comparaisons multiples des concentrations en aluminium selon le fabricant (Test de Games-Howell)..... | 131 |
| Tableau 65. Poids par cuillère de PPN (g) | 133 |
| Tableau 66. DHI hebdomadaires d'Al chez les nourrissons allaités ($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{semaine}$) | 137 |
| Tableau 67. Statistiques des concentrations en métaux toxiques dans les PPN ($n = 61$)..... | 138 |
| Tableau 68. Statistiques des métaux toxiques dans le lait maternel ($n = 12$)..... | 139 |
| Tableau 69. Statistiques des minéraux d'intérêt nutritionnel dans les PPN | 142 |
| Tableau 70. Statistiques des minéraux d'intérêt nutritionnel dans le lait maternel | 143 |
| Tableau 71. Analyse des concentrations en éléments essentiels dans les PPN à base de protéines de Soja par rapport aux normes..... | 149 |
| Tableau 72. Teneurs en aluminium dans les PPN selon quelques études internationales ... | 155 |
| Tableau 73. Domaine expérimental | 176 |
| Tableau 74. Matrice d'expérience (niveaux codés)..... | 177 |
| Tableau 75. Plan d'expérimentation (niveaux réels) | 177 |
| Tableau 76. Plan d'expérimentation et réponses mesurées..... | 178 |
| Tableau 77. Estimation et significativité des coefficients..... | 179 |
| Tableau 78. Tableau d'analyse de la variance | 181 |
| Tableau 79. Estimations et statistiques des coefficients | 182 |
| Tableau 80. Facteurs fixés pour le reste de l'étude..... | 183 |
| Tableau 81. Facteurs étudiés et domaine expérimental..... | 183 |
| Tableau 82. Plan d'expérimentation | 184 |
| Tableau 83. Plan d'expérimentation avec réponses | 184 |
| Tableau 84. Caractéristiques du plan d'étude pour l'optimisation des facteurs..... | 185 |
| Tableau 85. ANOVA pour le modèle quadratique réduit | 185 |
| Tableau 86. Statistiques d'ajustement et qualité du modèle..... | 186 |
| Tableau 87. Estimation des coefficients et statistiques des facteurs | 186 |
| Tableau 88. Résumé des résultats expérimentaux et indicateurs statistiques | 192 |
| Tableau 89. Tableau des solutions optimales pour maximiser la réponse R1..... | 193 |
| Tableau 90. Validation expérimentale de la solution optimale prédite par le modèle..... | 197 |
| Tableau 91. Nombre des standards d'étalonnage et de validation selon le protocole V4 ... | 197 |
| Tableau 92. Protocole expérimental : Standards d'étalonnage..... | 198 |
| Tableau 93. Protocole expérimental : Standards de validation..... | 198 |
| Tableau 94. Résultats obtenus pour les standards d'étalonnage..... | 203 |
| Tableau 95. Résultats obtenus pour les standards de validation | 204 |
| Tableau 96. Paramètres des fonctions de réponse..... | 205 |
| Tableau 97. Analyse de variance (ANOVA) | 205 |
| Tableau 98. Validité des courbes | 206 |
| Tableau 99. Homogénéité des variances | 206 |
| Tableau 100. Paramètres des fonctions de réponse..... | 208 |
| Tableau 101. Analyse de variance (ANOVA) | 208 |
| Tableau 102. Validité des courbes | 209 |
| Tableau 103. Homogénéité des variances | 209 |
| Tableau 104. Concentrations obtenues par prédiction inverse..... | 211 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 105. Moyennes des concentrations prédites par jour | 212 |
| Tableau 106. Critères de validations en utilisant le modèle $Y = a.x^2 + b.x + c$ | 212 |
| Tableau 107. Profils d'exactitude en utilisant le modèle $Y = a.x^2 + b.x + c$ | 213 |
| Tableau 108. Classification des eaux du robinet selon la commune..... | 220 |
| Tableau 109. Statistiques descriptives de l'aluminium dans les eaux analysées..... | 221 |
| Tableau 110. Résultats des tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk)..... | 222 |
| Tableau 111. Résumé des résultats du test de Mann-Whitney..... | 223 |
| Tableau 112. Résultats des tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk)..... | 226 |
| Tableau 113. Résumé des résultats du test U de Mann-Whitney..... | 227 |
| Tableau 114. Statistiques descriptives des teneurs en Al selon le bassin hydrographique | 229 |
| Tableau 115. Résumé des statistiques descriptives..... | 230 |
| Tableau 116. Classification des réactifs utilisés | 238 |
| Tableau 117. Paramètres mesurés et techniques analytiques..... | 240 |
| Tableau 118. Liste des variables physico-chimiques pour l'évaluation du comportement de l'Al | 241 |
| Tableau 119. Normes Algériennes de qualité des eaux de distribution | 243 |
| Tableau 120. Normes Algériennes de qualité des eaux de source | 243 |
| Tableau 121. Normes Algériennes de qualité des eaux minérales naturelles | 244 |
| Tableau 122. Valeurs maximales autorisées pour les teneurs en minéraux présents sur l'étiquetage des eaux ayant la mention « convient pour les nourrissons » | 244 |
| Tableau 123. Comparaison des teneurs en Al avant et après ébullition (eau du robinet)..... | 245 |
| Tableau 124. Comparaison des concentrations moyennes d'aluminium avant et après ébullition dans trois types de casseroles | 248 |
| Tableau 125. Comparaison des concentrations moyennes d'Al avant et après ébullition | 252 |
| Tableau 126. Relargage de l'Al après ébullition selon le type d'eau et la casserole utilisée | 255 |
| Tableau 127. Tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk) | 256 |
| Tableau 128. Tableau récapitulatif du test U de Mann-Whitney pour la Casserole 1 | 257 |
| Tableau 129. Tableau récapitulatif du test de Mann-Whitney pour la Casserole 2 | 260 |
| Tableau 130. Récapitulatif du test U de Mann-Whitney-Casserole 3..... | 262 |
| Tableau 131. Paramètres physico-chimiques des eaux minérales..... | 264 |
| Tableau 132. Conformité des eaux minérales aux normes algériennes | 265 |
| Tableau 133. Paramètres physico-chimiques des eaux de source..... | 265 |
| Tableau 134. Conformité des eaux de source | 266 |
| Tableau 135. Paramètres physico-chimiques de l'eau du robinet | 266 |
| Tableau 136. Conformité des eaux du robinet | 267 |
| Tableau 137. Résultats des Test de KMO et de Bartlett | 271 |
| Tableau 138. Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk | 271 |
| Tableau 139. Signification statistique (p-value bilatérale) (n = 66)..... | 273 |
| Tableau 140. Résultats de l'ANOVA et des coefficients de régression (Al) | 274 |
| Tableau 141. Résultats de l'ANOVA et des coefficients de régression (Al ₁) | 274 |
| Tableau 142. Résultats de l'ANOVA et des coefficients de régression (Al ₂) | 274 |
| Tableau 143. Résultats de l'ANOVA et des coefficients de régression (Al ₃) | 275 |
| Tableau 144. Variance expliquée par les composantes principales | 275 |
| Tableau 145. Variance expliquée par les composantes principales (CP)..... | 277 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. Micrographies ESEM de l'échantillon indien après deux heures d'exposition à l'eau bouillante (A) et à une solution simulant un aliment acide à température d'ébullition préparée avec de l'eau du robinet (B) | 11 |
| Figure 2. Mécanismes de rétention et de diffusion de l'aluminium dans les couches cutanées | 15 |
| Figure 3. Voie transferrine-transferrine | 16 |
| Figure 4. Facteurs influençant l'accumulation de l'aluminium dans les tissus et le développement de la toxicité | 17 |
| Figure 5. Schéma représentant la distribution possible de l'aluminium dans le plasma, la barrière hémato-encéphalique (BHE), le liquide céphalo-rachidien (LCR), le liquide interstitiel cérébral, ainsi que dans les compartiments cellulaires et pathologique | 20 |
| Figure 6. « Aluminium - réactif au Lumogallion » dans des cellules neuronales et gliales probables au niveau du lobe temporal et de l'hippocampe chez un donneur de 14 ans (A10) diagnostiqué avec un trouble du spectre autistique | 22 |
| Figure 7. Principe du spectrophotomètre d'absorption atomique | 28 |
| Figure 8. Evolution des limites tolérables pour l'aluminium | 32 |
| Figure 9. Evénements clés dans le développement des préparations pour nourrissons, de la révolution industrielle à nos jours | 34 |
| Figure 10. Implication des micronutriments dans les principales voies métaboliques | 37 |
| Figure 11. Ligne de fabrication des préparations infantiles en poudre | 45 |
| Figure 12. Localisation géographique de la wilaya d'Annaba en Algérie et répartition de ses 12 communes | 55 |
| Figure 13. Organisation territoriale des communes de la wilaya d'Annaba selon leur rattachement aux EPSP | 57 |
| Figure 14. Répartition et pourcentage de la population totale attribuée à chaque EPSP | 58 |
| Figure 15. Répartition des mères enquêtées selon les EPSP | 62 |
| Figure 16. Répartition des mères enquêtées par commune | 63 |
| Figure 17. Répartition des mères selon les catégories d'âge | 63 |
| Figure 18. Répartition selon le type d'allaitement de la fratrie | 66 |
| Figure 19. Répartition selon l'âge gestationnel du dernier accouchement | 66 |
| Figure 20. Répartition des nourrissons selon le sexe | 67 |
| Figure 21. Répartition des nourrissons selon les catégories d'âge | 67 |
| Figure 22. Répartition des nouveau-nés selon la classification pondérale à la naissance | 68 |
| Figure 23. Répartition des nourrissons selon leur état staturo-pondéral actuel | 69 |
| Figure 24. Répartition des nourrissons selon le mode d'alimentation au moment de l'enquête | 70 |
| Figure 25. Période de décision des mères concernant l'allaitement maternel | 72 |
| Figure 26. Répartition des mères selon le moment de leur décision | 73 |
| Figure 27. Répartition des marques de lait infantile utilisées par les mères | 74 |
| Figure 28. Volume de lait préparé en fonction de l'âge du bébé | 76 |
| Figure 29. Statut vaccinal des nourrissons et nombre de vaccins en retard | 79 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 30. Illustration de la numérotation et de la sélection systématique des boîtes de lait infantile sur un niveau de stockage | 95 |
| Figure 31. Etapes de la digestion réalisée au laboratoire d'Hydrologie-Bromatologie (réalisée) | 99 |
| Figure 32. Répartition des laits infantiles par pays de fabrication (n = 61) | 110 |
| Figure 33. Répartition des préparations infantiles selon la marque | 111 |
| Figure 34. Répartition des laits infantiles selon le stade d'utilisation | 112 |
| Figure 35. Répartition des laits infantiles selon leur classification nutritionnelle | 112 |
| Figure 36. Caractéristiques des mères donneuses de lait maternel et de leurs nourrissons.. | 114 |
| Figure 37. Distribution des concentrations en aluminium selon la marque (Boxplot – Kruskal-Wallis) | 117 |
| Figure 38. Comparaisons post-hoc des concentrations en aluminium selon les marques (Rangs moyens) | 119 |
| Figure 39. Distribution des concentrations en aluminium selon les catégories de lait infantile (Boxplot) | 121 |
| Figure 40. Comparaison des catégories de lait selon les rangs moyens des concentrations en aluminium (Kruskal-Wallis) | 123 |
| Figure 41. Distribution des concentrations en aluminium dans le lait maternel et les laits standards de 1 ^{er} âge | 124 |
| Figure 42. Distribution des concentrations en aluminium selon l'étape d'alimentation..... | 128 |
| Figure 43. Comparaison des concentrations en aluminium selon le fabricant..... | 130 |
| Figure 44. Rangs moyens des concentrations en aluminium selon le fabricant..... | 132 |
| Figure 45. Comparaison des DHI aux normes (EFSA, JECFA)..... | 134 |
| Figure 46. Répartition des DHI en pourcentage de la DHT | 135 |
| Figure 47. Evolution des DHI selon l'âge des nourrissons | 136 |
| Figure 48. Répartition des DHI selon le sexe..... | 136 |
| Figure 49. Fréquence de détection des métaux toxiques dans les PPN..... | 138 |
| Figure 50. Fréquence de détection des métaux toxiques dans le lait maternel..... | 139 |
| Figure 51. Comparaison des concentrations en métaux potentiellement toxiques entre le lait maternel et les laits standards 1 ^{er} âge | 140 |
| Figure 52. Conformité des concentrations en métaux lourds aux seuils réglementaires..... | 141 |
| Figure 53. Concentrations des minéraux d'intérêt nutritionnel selon l'étape de PPN..... | 142 |
| Figure 54. Teneurs en minéraux d'intérêt nutritionnel dans le lait maternel | 144 |
| Figure 55. Comparaison des concentrations des minéraux d'intérêt nutritionnel entre le lait maternel et les préparations infantiles standards 1 ^{er} âge | 145 |
| Figure 56. Conformité des concentrations en éléments essentiels dans le PPN aux normes réglementaires algériennes | 146 |
| Figure 57. Conformité des concentrations en éléments essentiels dans les PPN standards de 1 ^{er} âge aux normes réglementaires européennes | 147 |
| Figure 58. Analyse des concentrations en éléments essentiels dans les laits de suite par rapport aux normes européennes | 148 |
| Figure 59. Représentation schématique de la réaction de formation du complexe Aluminium–Rouge d'Alizarine S | 169 |
| Figure 60. Balayage spectral du complexe Rouge d'Alizarine S-Aluminium..... | 173 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 61. Balayage spectral du complexe Rouge d'Alizarine S-Al avec ajout de PVP 40.. | 173 |
| Figure 62. Etude graphique des effets : Effets individuels des facteurs sur la réponse. (Diagramme en bâtons) | 180 |
| Figure 63. Effets Pareto individuels | 181 |
| Figure 64. Y expérimental / Y calculé. | 182 |
| Figure 65. Effet des facteurs sur la réponse (R1) | 188 |
| Figure 66. Effet d'interaction entre la concentration en Rouge d'Alizarine S et le temps sur la réponse (R1) | 189 |
| Figure 67. Représentation en surface 3D de l'influence des facteurs étudiés (Rouge d'Alizarine et Temps) sur l'absorbance (R1) | 190 |
| Figure 68. Graphique de la normalité des résidus | 191 |
| Figure 69. Graphique des résidus externes studentisés en fonction des valeurs prédites | 191 |
| Figure 70. Désirabilité combinée et individuelle pour la solution optimale sélectionnée. | 193 |
| Figure 71. Graphique de surface en 3D pour la désirabilité. | 194 |
| Figure 72. Distribution des résidus en fonction des concentrations réelles (Jour1) | 207 |
| Figure 73. Distribution des résidus en fonction des concentrations réelles (Jour2) | 207 |
| Figure 74. Distribution des résidus en fonction des concentrations réelles (Jour3) | 207 |
| Figure 75. Résidus en fonction des concentrations réelles - Jour 1 | 210 |
| Figure 76. Résidus en fonction des concentrations réelles - Jour 2 | 210 |
| Figure 77. Résidus en fonction des concentrations réelles - Jour 3 | 210 |
| Figure 78. Profil d'exactitude en utilisant le modèle $Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ | 213 |
| Figure 79. Représentation graphique des erreurs totales. | 214 |
| Figure 80. Linéarité de la méthode. | 215 |
| Figure 81. Carte de contrôle | 216 |
| Figure 82. Répartition des échantillons analysés selon le type d'eau | 218 |
| Figure 83. Répartition des eaux conditionnées analysées selon leur type. | 218 |
| Figure 84. Répartition des eaux conditionnées analysées selon le bassin hydrographique. | 219 |
| Figure 85. Répartition des eaux du robinet selon leur origine | 221 |
| Figure 86. Comparaison des teneurs en Al entre l'eau conditionnée et l'eau du robinet. | 223 |
| Figure 87. Distribution des teneurs en Al dans l'ensemble des échantillons analysés | 224 |
| Figure 88. Comparaison des distributions d'Al entre l'eau conditionnée en bouteille et l'eau du robinet (Test de Mann-Whitney) | 225 |
| Figure 89. Comparaison des concentrations en Al entre les eaux minérales et les eaux de source. | 226 |
| Figure 90. Distribution des concentrations en Al dans les eaux minérales et les eaux de source | 227 |
| Figure 91. Comparaison des distributions d'Al entre les eaux minérales et les eaux de source (Test de Mann-Whitney) | 228 |
| Figure 92. Comparaison des concentrations en aluminium dans les eaux conditionnées selon le bassin hydrographique. | 230 |
| Figure 93. Distribution des concentrations en aluminium dans l'eau du robinet selon l'origine hydrologique. | 231 |
| Figure 94. Comparaison de la teneur en aluminium aux normes selon le type d'eau | 232 |
| Figure 95. Al relargué par la Casserole 1 en fonction de l'origine de l'eau du robinet | 246 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 96. Al relargué par la Casserole 2 en fonction de l'origine de l'eau du robinet | 246 |
| Figure 97. Al relargué par la Casserole 3 en fonction de l'origine de l'eau du robinet | 247 |
| Figure 98. Pourcentage d'augmentation de la teneur en aluminium après ébullition dans les trois casseroles..... | 248 |
| Figure 99. Al relargué par la Casserole 1 en fonction de l'origine de l'eau minérale | 249 |
| Figure 100. Al relargué par la Casserole 2 en fonction de l'origine de l'eau minérale..... | 250 |
| Figure 101. Al relargué par la Casserole 3 en fonction de l'origine de l'eau minérale..... | 250 |
| Figure 102. Pourcentage d'augmentation de la teneur en aluminium après ébullition de l'eau minérale dans les trois casseroles..... | 251 |
| Figure 103. Al relargué par la Casserole 1 en fonction de l'origine de l'eau de source. | 252 |
| Figure 104. Al relargué par la Casserole 2 en fonction de l'origine de l'eau de source. | 253 |
| Figure 105. Al relargué par la Casserole 3 en fonction de l'origine de l'eau de source | 253 |
| Figure 106. Pourcentage d'augmentation de l'aluminium relargué (Eaux de source)..... | 254 |
| Figure 107. Distribution des concentrations en aluminium selon le type d'eau | 256 |
| Figure 108. Test de Mann-Whitney – Comparaison eau en bouteille et eau du robinet..... | 258 |
| Figure 109. Histogramme des concentrations d'aluminium – Casserole 1 | 259 |
| Figure 110. Comparaison du relargage d'aluminium dans la casserole 2 entre l'eau du robinet et l'eau en bouteille | 260 |
| Figure 111. Distribution des concentrations en aluminium relargué dans la casserole 2..... | 261 |
| Figure 112. Comparaison du relargage d'aluminium dans la casserole 3 entre l'eau du robinet et l'eau en bouteille | 262 |
| Figure 113. Distribution des concentrations en aluminium relargué dans la casserole 3..... | 263 |
| Figure 114. Effets de l'ébullition sur la surface des casseroles en aluminium..... | 264 |
| Figure 115. Conformité des échantillons d'eau du robinet aux recommandations pour la préparation des biberons..... | 268 |
| Figure 116. Taux de conformité des eaux minérales aux critères pour la préparation des biberons | 269 |
| Figure 117. Conformité des eaux de source aux recommandations pour les nourrissons..... | 270 |
| Figure 118. Carte thermique des corrélations entre paramètres physico-chimiques et formes d'aluminium..... | 272 |
| Figure 119. Décomposition de l'inertie totale..... | 276 |
| Figure 120. Tracé d'effondrement (Scree plot)..... | 277 |
| Figure 121. Graphe des variables (ACP)..... | 278 |
| Figure 122. Graphe des individus (ACP) | 279 |
| Figure 123. Graphe des individus (ACP) | 279 |
| Figure 124. Graphe des modalités (ACP) | 280 |
| Figure 125. Cercle des corrélations des variables sur les axes 1 et 3 de l'ACP..... | 281 |
| Figure 126. Projection des individus dans le plan factoriel (Dim 1 et Dim 3) de l'ACP..... | 281 |
| Figure 127. Cercle des corrélations des variables dans le plan factoriel (Dim 2 et Dim 3) de l'ACP..... | 282 |
| Figure 128. Graphe des individus dans le plan factoriel (Dim 2 et Dim 3) de l'ACP | 283 |
| Figure 129. Classification hiérarchique des échantillons d'eau et de leurs paramètres physico-chimiques | 284 |
| Figure 130. Constellation Plot des échantillons d'eau selon leur composition chimique..... | 285 |

LISTE DES ABREVIATIONS

A : Absorbance.

AAP : Académie Américaine de Pédiatrie.

A β 42 : Amyloïde bêta 42.

ACH : Analyse de Classification Hiérarchique.

ACP : Analyse en composante principale.

ADN : Acide Désoxy-ribo-Nucléique.

AFSSA : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliment.

AG : Acide gras.

ANC : Apports Nutritionnels Conseillés.

ARA : acide arachidonique.

ASIA : Syndrome auto-immun induit par les adjuvants.

BHE : Barrière Hémato-Encéphalique.

BMP-2 : Protéine morphogénétique osseuse 2 (Bone Morphogenetic Protein-2 C).

BPF : Bonnes Pratiques de Fabrication.

C ou Conc. : Concentration.

CAC : Commission du Codex Alimentarius.

CAS : Service des résumés analytiques de chimie (Chemical Abstracts Service).

CDC : Centres pour le Contrôle et la Prévention des Maladies.

CHU : Centre Hospitalo-Universitaire.

COVID : Coronavirus Disease.

DAMPs : Motifs moléculaires associés aux dommages.

DFFITS : Difference in Fitted values (Différence des valeurs ajustées).

DHA : acide docosahexaénoïque.

DHI : Dose Hebdomadaire Ingérée.

DHT : Dose Hebdomadaire Tolérable.

DHTP : Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire.

DJT : Dose Journalière Tolérable.

EFSA : Autorité européenne de sécurité des aliments.

EPSP : Etablissement Public de Santé de Proximité.

ER : Equivalent Rétinol.

ESEM : Environmental Scanning Electron Microscopy (Microscopie Electronique à Balayage Environnemental).

ET : Erreur Totale.

Exp. : Expérience.

F. : Facteur.

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

FDA : Administration des Aliments et des Médicaments.

JECFA : Comité mixte FAO/OMS d'experts des additifs alimentaires.

HA : Hypo-allergénique.

ICP-MS : Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif.

IL- : Interleukine.

INAA : Activation neutronique.

Kcal : Kilo calorie.

LCR : Liquide Céphalo-Rachidien.

LDM : Limite de Détection Minimale.

LLOQ : Lower Limit Of Quantification (borne inférieure de quantification).

LMMS ou LAMMA : Microsonde laser couplée à la spectrométrie de masse.

LQM : Limite de Quantification.

MC-LR/L : microcystine-LR par litre

MCF7 : Cellules cancéreuses du sein humain.

mJ : Milli joule.

MMP : Métalloprotéinases de la matrice.

MOC : Ménages Ordinaires et Collectifs.

MP : Maladie de Parkinson.

NLRP3 : Récepteur de type NOD contenant un domaine pyrine 3.

NTU : unité de turbidité néphélométrique.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

p : Probabilité.

PCB : Polychlorobiphényles.

PMI : Protection Maternelle et Infantile.

PPN : Préparations pour nourrissons.

PRESS : Predicted Residual Sum of Squares (somme des carrés des résidus de prédiction).

PVP : PolyVinylPyrrolydone.

Rand. : Randomisation.

Répet. : Répétition.

RGO : Reflux Gastro-Œsophagien.

SAA : Spectroscopie d’Absorption Atomique.

SD : Ecart-type.

SEMEP : Service d’Epidémiologie et de Médecine Préventive.

SEP : Sclérose En Plaque.

SIN : Système International de Numérotation des additifs alimentaires.

SRO : Solutions de Réhydratation Orale.

TGF- β_1 : Facteur de croissance transformant bêta-1 (Transforming Growth Factor Beta-1).

TSA : troubles du spectre autistique.

UB : Moyenne avec substitution des valeurs inférieures à la limite de quantification par la limite supérieure.

ULOQ : Upper Limit Of Quantification (borne supérieure de quantification)

UV : Ultra-Violet.

LISTE DES ANNEXES

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| ANNEXE 1. Questionnaire destiné aux mamans de nourrissons. | xxviii |
| ANNEXE 2. Fiche de renseignement. | xxxii |
| ANNEXE 3. Fiche de prélèvement des préparations infantiles pour nourrissons. | xxxiii |
| ANNEXE 4. Identification des préparations pour nourrissons analysées. | xxxiv |
| ANNEXE 5. Fiches de prélèvement des eaux. | xxxv |
| ANNEXE 6. Identification des échantillons d'eaux. | xxxvii |
| ANNEXE 7. Courbes d'étalonnage et équations de calculs (Aluminium). | xxxix |
| ANNEXE 8. Courbe d'étalonnage des ions fluorures. | xl |
| ANNEXE 9. Courbe d'étalonnage des ions nitrates. | xli |
| ANNEXE 10. DHI d'aluminium à partir de l'eau chez les nourrissons. | xlii |
| ANNEXE 11. Réactifs utilisés en analyse des eaux. | xliv |
| ANNEXE 12. Textes réglementaires. | xlv |

INTRODUCTION

Le lait joue un rôle essentiel dans l'alimentation des nourrissons [1]. Le lait maternel constitue l'aliment idéal qui apporte une nutrition optimale et de nombreux bénéfices pour la santé, tant pour la mère que pour l'enfant [2]. Toutefois, dans certaines situations, le recours aux laits infantiles peut s'avérer nécessaire, en raison notamment de problèmes de santé maternelle, de difficultés d'allaitement ou d'un apport nutritionnel complémentaire pour le nourrisson [3]. Les laits infantiles les plus courants sont à base de lait de vache. Il existe aussi des formules adaptées aux intolérances ou spécifiquement conçues pour des besoins médicaux [4].

Les fabricants s'efforcent de rapprocher la composition des laits infantiles de celle du lait maternel, afin d'assurer un apport nutritionnel satisfaisant. Cependant, ces produits peuvent contenir des contaminants, notamment des métaux toxiques, issus des matières premières, de procédés de fabrication défectueux ou de mauvaises pratiques de reconstitution [5].

L'exposition aux métaux toxiques chez les nourrissons est devenue une préoccupation majeure en raison de l'urbanisation et de l'industrialisation [6]. Les nourrissons, en raison de leur faible poids corporel et de l'immaturation de leurs organes, sont particulièrement vulnérables à ces substances [7].

L'aluminium, en particulier, est un métal toxique dépourvu de rôle biologique bénéfique, dont la toxicité est reconnue par les autorités sanitaires internationales [8,9]. Chez le nourrisson, son absorption digestive pourrait être plus importante, et son élimination rénale moins efficace [10,11]. Une exposition prolongée favorise son accumulation dans les tissus osseux, avec une cinétique d'élimination très lente [12]. Chez les prématurés ayant été exposés précocement à l'aluminium, des troubles osseux ont été signalés à l'adolescence [13].

L'aluminium a également la capacité de traverser la barrière hémato-encéphalique. Cette dernière, incomplètement formée durant la première année de vie, est plus perméable aux toxiques [14]. Plusieurs études ont mis en évidence son impact neurodéveloppemental, avec des répercussions sur le développement cognitif et l'apprentissage à long terme. De plus, l'aluminium a été impliqué dans des affections respiratoires (fibrose pulmonaire et réduction de la fonction pulmonaire) ainsi qu'à des altérations de la fertilité et du développement embryonnaire, comme l'ont montré plusieurs études sur des animaux [15,16].

Des recherches ont aussi montré que l'aluminium injecté sous forme d'hydroxyde d'aluminium, utilisé comme adjuvant vaccinal, peut être capté par les cellules immunitaires et transporté dans l'organisme. Chez le nourrisson, ce phénomène est amplifié par l'immaturation neurologique, favorisant la migration de ces cellules jusqu'au cerveau [17]. En 2017, Le Pr Exley, spécialiste

de la toxicité de l'aluminium, a analysé le tissu cérébral de cinq personnes décédées diagnostiquées autistes et y a détecté des concentrations anormalement élevées d'aluminium, principalement stocké à l'intérieur des cellules [18].

Donné de manière exclusive aux nourrissons, le lait infantile devrait être exempt de toute contamination, or de nombreuses études ont révélé la présence d'aluminium dans la majorité des laits infantiles commercialisés dans différents pays, avec des concentrations variables selon les marques et les formulations, parfois à des niveaux excédant les normes de potabilité de l'eau. Cette contamination devient encore plus préoccupante lorsque l'eau utilisée pour la reconstitution des biberons est elle-même chargée en aluminium [19,20]. La sécurité et la qualité du lait destiné aux nourrissons, qu'il soit maternel ou infantile, sont aujourd'hui au centre des préoccupations des familles et des autorités sanitaires [21,22].

En Algérie, aucune étude publiée n'a encore documenté l'exposition des nourrissons à l'aluminium via les formules infantiles. Ce travail de thèse vise à combler ce manque de données scientifiques.

L'objectif principal de ce travail est de quantifier la teneur en aluminium dans les préparations pour nourrissons de moins de 12 mois et dans les eaux utilisées pour leur reconstitution, dans le but d'estimer l'exposition réelle des nourrissons à ce métal. Une comparaison avec les taux d'aluminium dans le lait maternel a également été envisagée afin d'évaluer les différences entre les deux sources d'alimentation infantile.

Les objectifs secondaires consistent, d'une part, à analyser les pratiques des mères concernant l'allaitement, le choix du lait infantile, l'eau utilisée et les modalités de préparation des biberons, et d'autre part, à développer et valider une méthode fiable, sensible et économique pour le dosage de l'aluminium dans les eaux de reconstitution.

Ce travail est divisé en deux grandes parties :

- La première est une revue bibliographique divisée en deux chapitres : le premier est consacré à l'aluminium, abordant ses propriétés physico-chimiques, sa toxicité, son métabolisme et ses effets spécifiques chez les nourrissons ; le second traite des préparations pour nourrissons, en détaillant leur composition, leur procédé de fabrication et le règlement qui les encadre.
- La seconde partie, expérimentale, est structurée en quatre chapitres. Le premier présente une enquête réalisée auprès de mères de nourrissons dans la wilaya d'Annaba. Le second expose les résultats d'analyse des teneurs en aluminium dans les formules infantiles, comparés à ceux

du lait maternel. Le troisième chapitre est dédié au développement, l'optimisation et la validation d'une méthode spectrophotométrique permettant la quantification de l'aluminium dans les eaux utilisées pour la reconstitution des PPN. Enfin, le quatrième chapitre analyse le relargage d'aluminium à partir d'ustensiles en aluminium lors du chauffage domestique, ainsi que les paramètres physico-chimiques des eaux utilisées, à l'aide d'outils chimométriques pour affiner l'interprétation des données.

Les résultats attendus contribueront à une meilleure prévention de l'exposition des nourrissons à l'aluminium, à l'amélioration de la réglementation en matière de nutrition infantile, ainsi qu'à la sensibilisation des parents et des professionnels de santé. De plus, ce travail apportera des données sur la contamination des laits infantiles en Algérie et pourra éclairer les décisions en matière de santé publique et de nutrition infantile.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I.

Aluminium et toxicité

1. Nature et propriétés de l'aluminium

1.1. Historique de l'utilisation de l'aluminium

L'aluminium, aujourd'hui considéré comme le métal le plus abondant de la croûte terrestre, fut autrefois un matériau rare et précieux. Identifié pour la première fois en 1808 par Sir Humphrey Davy, ce n'est qu'en 1825 que le chimiste danois Hans Christian Oersted parvient à en isoler un échantillon tangible. En 1855, Henri Sainte-Claire Deville présente un lingot d'aluminium à l'Exposition universelle de Paris, à une époque où son coût dépassait celui de l'or [23,24].

Une avancée majeure survient en 1886, lorsque Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (États-Unis), travaillant indépendamment, mettent au point un procédé électrolytique utilisant la cryolithe fondue pour dissoudre l'alumine (Al_2O_3).

Cette innovation marque le début de la production industrielle d'aluminium à grande échelle et à faible coût [25].

Malgré ces progrès, l'adoption de l'aluminium a été initialement lente, les industriels privilégiant des matériaux tels que le fer ou le cuivre. Ce n'est qu'avec les améliorations de performance, de durabilité et d'économie d'énergie que l'aluminium a su s'imposer dans des domaines variés tels que l'aéronautique, l'automobile, le bâtiment et l'emballage [26].

1.2. Description de l'aluminium

L'aluminium (Al), du latin « *alumen* », qui signifie léger, est le troisième élément le plus abondant de la croûte terrestre [27]. L'aluminium (symbole Al, numéro atomique 13, masse atomique 26,98 est un métal argenté, léger, malléable et ductile.

Il constitue environ 8 % de la lithosphère, après l'oxygène (42 %) et le silicium (28 %). Il peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre [28].

En raison de sa forte réactivité, l'aluminium n'existe pas à l'état natif dans la nature. Il se trouve toujours combiné à d'autres éléments tels que l'oxygène, le silicium et le fluor, présents dans les sols, les minéraux, les roches et les argiles. Il est extrait principalement de la bauxite [23].

2. Propriétés physico-chimiques de l'aluminium

L'aluminium se distingue par une faible densité ($2,7 \text{ g/cm}^3$), une excellente conductivité thermique et électrique, ainsi qu'une résistance à la traction et il est insoluble dans l'eau. Son point de fusion est de $660 \text{ }^\circ\text{C}$, et son point d'ébullition avoisine $2467 \text{ }^\circ\text{C}$.

La majorité des composés de l'aluminium se présentent sous forme solide avec des points de fusion élevés. Leur solubilité dépend du pH, car le cation (Al^{3+}) a une grande affinité pour l'ion hydroxyde, ce qui favorise leur précipitation [29].

Sa surface s'oxyde rapidement à l'air, formant une fine couche d'alumine (Al_2O_3) qui le protège de la corrosion. Il réagit avec les halogènes (chlore, fluor, brome, iode) pour produire des trihalogénures [30,31].

En solution, il présente principalement l'état d'oxydation +III. L'aluminium pur résiste à l'acide nitrique grâce à sa couche d'alumine, il est réactif avec divers acides et bases fortes, notamment l'acide chlorhydrique, sulfurique chaud, fluorhydrique et les solutions alcalines, libérant alors de l'hydrogène et des aluminates solubles [28,32].

Sous forme fondue, l'aluminium forme des alliages avec des métaux comme le cuivre, le magnésium, le manganèse, le fer ou le silicium. En poudre, il peut être stabilisé (revêtu) ou pyrophorique (non revêtu), cette dernière forme pouvant s'enflammer spontanément au contact de l'air. Les deux types de poudres et les copeaux réagissent avec l'eau en libérant de l'hydrogène [33]. Il réagit vigoureusement avec les hydrocarbures halogénés, le méthanol, l'acide chlorhydrique, l'acide fluorhydrique, l'acide sulfurique et la soude [26].

Les propriétés de l'aluminium et de ses composés sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques de l'aluminium et de ses composés [34].

| Propriété | Aluminium | Oxyde d'aluminium | Hydroxyde d'aluminium | Phosphate d'aluminium | Chlorure d'aluminium |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Structure chimique | Al | Al ₂ O ₃ | Al(OH) ₃ | AlPO ₄ | AlCl ₃ |
| Couleur | Blanc argenté | Blanc | Blanc | Blanc | Blanc |
| Masse molaire (g/mol) | 26,98 | 101,94 | 78,01 | 121,95 | 133,34 |
| Densité à 20°C (g/cm ³) | 2,70 | 4,00 | 2,42 | 2,56 | 2,48 |
| Point de fusion (°C) | 660 | ~2000 | 300 | >1460 | 192,60 |
| Point d'ébullition (°C) | 2327 | 2980 | Non disponible | Non disponible | 182,71 (température de sublimation) |
| Solubilité dans l'eau | Insoluble | Soluble à 4°C, 0,000098 g/100 cm ³ ; insoluble dans l'eau chaude | Insoluble | Presque insoluble | Réagit violemment avec l'eau pour former de l'acide chlorhydrique et de la chaleur |
| Solubilité dans d'autres solvants | Soluble dans HCl, H ₂ SO ₄ , eau chaude et alcalis | Très légèrement soluble dans les acides, les alcalis | Soluble dans les solutions alcalines ou acides | Presque insoluble dans l'acide acétique ; très légèrement soluble dans les acides HCl et HNO ₃ concentrés | Soluble dans le benzène, le tétrachlorure de carbone et le chloroforme |
| Pression de vapeur | 1 mm Hg à 1284°C | 1 mm Hg à 2158°C | Non disponible | Non disponible | 1 mm Hg à 100°C |

3. Sources d'exposition à l'aluminium

3.1. Air

L'aluminium présent dans l'air provient en majorité des poussières naturelles issues de la désagrégation des sols et des roches. Environ 13 % de l'aluminium atmosphérique est d'origine anthropique, principalement issu d'activités industrielles telles que la combustion du charbon, la métallurgie, la soudure ou l'agriculture [35].

Dans des conditions atmosphériques normales, la concentration moyenne d'aluminium est de 100 ng/m³, correspondant à une exposition quotidienne de 1,4 µg. Cette valeur peut être multipliée par 1000 dans les zones industrialisées, atteignant ainsi 1,4 mg par jour [36]. La fumée de cigarette représente également une source notable d'exposition [37].

3.2. Eau

L'aluminium peut être présent dans l'eau sous forme insoluble, colloïdale ou soluble, selon le pH et les interactions avec d'autres éléments. Les précipitations acides contribuent à mobiliser l'aluminium des sols vers les milieux aquatiques, en favorisant sa solubilité. Ce phénomène est accentué lors de la fonte des neiges ou des épisodes orageux [30,35]. L'activité humaine (exploitation minière, production industrielle) accentue cette contamination [38].

En outre, les stations de traitement utilisent des sels d'aluminium comme agents coagulants (sulfate d'aluminium), générant des concentrations résiduelles si les installations sont défectueuses. Des taux supérieurs à 200 µg/L peuvent être révélateurs d'une mauvaise qualité de traitement [39,40]. A des concentrations supérieures à 0,1 mg/l, il peut entraîner des dépôts de floccs d'hydroxyde d'aluminium et accentuer les changements de couleur liés au fer, provoquant des plaintes des consommateurs [41].

3.3. Aliments

L'aluminium est naturellement présent dans certains aliments, ou ajouté via des additifs alimentaires et matériaux de cuisson/emballage. Sa concentration varie selon les pratiques agricoles, les procédés industriels et la nature du produit [35].

3.3.1. Boissons

Les canettes en aluminium augmentent les niveaux d'exposition. Les infusions de thé sont particulièrement riches en aluminium, notamment en raison de l'acidité des sols de culture du *Camellia sinensis*. Des études ont relevé des concentrations d'aluminium de 3 à 5,9 mg/L dans le thé infusé, soit environ 10 fois plus que dans le café. Certaines infusions peuvent couvrir jusqu'à 50 % de l'apport quotidien en aluminium [42,43]

3.3.2. Fruits et légumes

L'aluminium dans les fruits et légumes dépend de l'eau d'irrigation, de la composition des sols et de la variété des plantes. Pendant leur croissance, l'aluminium est absorbé depuis le sol et se répartit dans les différentes parties de la plante.

Certaines espèces accumulent davantage d'aluminium dans leurs racines, tandis que d'autres, le concentrent principalement dans les feuilles. En ce qui concerne les légumes, les teneurs les plus élevées en aluminium ont été enregistrées dans des courges, carottes, courgettes, choux, cresson et épinards, avec une moyenne de 27,5 mg/kg, tandis que les haricots verts cuits présentaient les concentrations les plus faibles (3,40 mg/kg) [42,44].

3.3.3. Produits d'origine animale

Comme chez l'homme, l'aluminium s'accumule chez les animaux via l'eau, l'alimentation et la pollution de l'environnement. De plus, dans le cas des produits transformés, l'utilisation d'additifs à base d'aluminium au cours de la production représente une source additionnelle d'aluminium [42,45].

3.3.4. Poissons et autres produits de la mer

Les poissons et fruits de mer accumulent de l'aluminium (Al^{3+}) en raison de de la pollution anthropique. Les poissons gras présentent des concentrations élevées d'aluminium allant jusqu'à 3,90 mg/kg, notamment en Espagne, au Maroc, en Afrique du Sud et en Mauritanie.

Les fruits de mer en contiennent plus, avec une moyenne de 204,6 mg/kg dans les ascidies en Corée du Sud [42]. Les algues comestibles, comme le *gulfweed*, contiennent environ 52,1 mg/kg et servent de bioindicateurs pour la pollution marine.

L'accumulation d'aluminium dépend de divers facteurs tels que le pH, l'espèce et les caractéristiques biologiques des organismes [35,46].

Un résumé des teneurs moyennes en aluminium dans différents groupes alimentaires est présenté en Tableau 2.

Tableau 2. Teneur moyenne en aluminium dans certains groupes alimentaires [42].

| Groupe alimentaire | Teneur moyenne en aluminium (mg/kg) |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| Boissons ^(a) | 1,11 |
| Œufs | 1,52 |
| Produits laitiers ^(b) | 3,05 |
| Fruits | 6,84 |
| Racines et tubercules | 9,6 |
| Produits de la mer | 11,9 |
| Légumes | 16 |

^(a) : Les boissons incluent l'eau, les jus et autres boissons sans alcool.

^(b) : Les produits laitiers incluent le lait, le fromage et le yaourt.

3.4. Additifs alimentaires

L'aluminium et ses composés sont couramment utilisés dans l'industrie agroalimentaire comme colorants, antiagglomérants, agents raffermissants, stabilisants ou supports de vitamines [47,48]. En Algérie, leur usage est réglementé par le décret exécutif du Journal Officiel Algérien n° 12-214 du 23 Joumada Ethania 1433 (15 mai 2012), qui fixe les doses maximales autorisées dans les produits finis [49].

Par exemple, l'aluminium métallique (E173) est autorisé en Bonne Pratique de Fabrication (BPF) pour l'enrobage de confiseries, tandis que des composés comme le silicate de potassium-aluminium (E554, E556, E559) peuvent atteindre 10 000 mg/kg dans certains produits à base de lactosérum.

Un tableau récapitulatif des principaux additifs à base d'aluminium, leur emploi et leurs limites réglementaires figurent en Tableau 3.

Tableau 3. Liste des additifs alimentaires à base d'Aluminium et leurs limites maximales dans les produits finis selon la réglementation Algérienne [49].

| SIN | Catégories d'aliments | Nom scientifique de l'Additif | Dose (mg/kg) |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 173 | Enrobage de confiseries aux sucres destinés à la décoration des gâteaux et de la pâtisserie | Aluminium | Bonne Pratique de Fabrication (BPF) |
| 523 | Fruits confits | Sulfate d'aluminium | 200 |
| 541 | Produits de boulangerie fine (génoise uniquement) | Phosphate acide de sodium-aluminium | 1000 |
| 542 | Produits similaires au lait et à la crème en poudre | Silicate de sodium-aluminium | 4400 |
| 554 | Lactosérum en poudre et produits à base de lactosérum en poudre, à l'exception des fromages de lactosérum | Silicate de potassium-aluminium | 10000 |
| 556 | Lactosérum en poudre et produits à base de lactosérum en poudre, à l'exception des fromages de lactosérum | Silicate de potassium-aluminium | 10000 |
| 559 | Lactosérum en poudre et produits à base de lactosérum en poudre, à l'exception des fromages de lactosérum | Silicate de potassium-aluminium | 10000 |

BPF signifie utiliser uniquement la quantité minimale nécessaire pour atteindre l'effet technologique recherché, sans qu'une dose précise ne soit fixée.

3.5. Formules pour nourrissons

La présence d'aluminium dans les laits infantiles a suscité une attention croissante ces dernières années. Les concentrations varient considérablement selon le type de formule et le pays. Par exemple, au Canada, certaines formules à base de lait ou de soja contiennent entre 440 et 730 µg/L, et jusqu'à 3442 µg/L dans les formules enrichies en fer [10,50]. Des teneurs élevées (6 à 1152 µg/L) sont également observées dans d'autres pays tels que le Royaume-Uni, le Nigeria,

l'Arabie Saoudite ou les Etats-Unis, en particulier dans les formules sans lactose, à base de soja ou hypoallergéniques [51].

3.6. Matériaux en contact alimentaire

En temps normal, l'aluminium utilisé dans les ustensiles et les emballages alimentaires est protégé par une couche naturelle d'oxyde (Al_2O_3), ce qui limite la migration vers les aliments [52]. Toutefois, cette barrière peut se dissoudre dans des conditions extrêmes de pH ($< 4,5$ ou $> 8,5$), en particulier en présence de fortes teneurs en sel ($> 3,5$ % NaCl) ou lors de la cuisson à haute température [48,53].

La migration dépend de plusieurs facteurs : durée de contact, température, acidité ou salinité de l'aliment, et intégrité du revêtement protecteur. Il est déconseillé d'utiliser des ustensiles en aluminium pour chauffer ou stocker des aliments acides ou salés, comme les sauces tomates, cornichons ou compotes [35]

Une illustration en microscopie électronique montre les altérations de la surface de l'aluminium après exposition à l'eau bouillante (Figure 1).

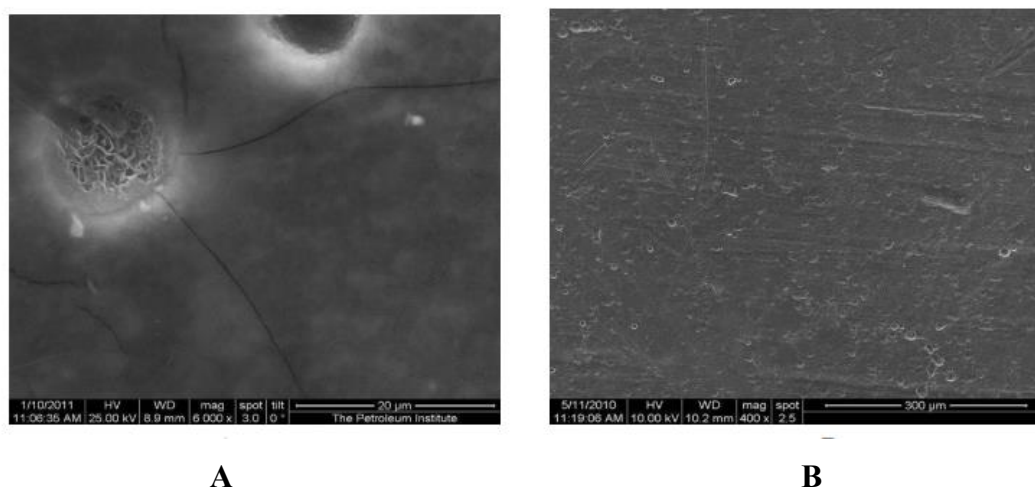


Figure 1. Micrographies ESEM de l'échantillon indien après deux heures d'exposition à l'eau bouillante (A) et à une solution simulant un aliment acide à température d'ébullition préparée avec de l'eau du robinet (B) [54].

Des estimations indiquent qu'en conditions réelles, l'exposition alimentaire à l'aluminium via les ustensiles peut atteindre jusqu'à 7 mg/jour, soit environ 0,1 mg/kg de poids corporel par jour [55,56].

3.7. Produits pharmaceutiques

Les antiacides, analgésiques tamponnés, antidiarrhéiques et certains médicaments contiennent des quantités significatives d'aluminium. Les apports journaliers varient de 126 à 728 mg pour les analgésiques, et jusqu'à 5000 mg pour les antiacides [50]. Ces doses sont bien supérieures à celles retrouvées dans l'eau ou les aliments [48].

Les médicaments administrés par voie intraveineuse, comme l'albumine ou les sels minéraux, peuvent également contenir de l'aluminium. Cette voie d'administration contourne la barrière digestive, nécessitant une surveillance particulière chez les patients insuffisants rénaux [50].

Par ailleurs, l'aluminium est utilisé comme adjuvant dans environ 60 % des vaccins humains, sous forme d'oxyhydroxyde ou d'hydroxyphosphate d'aluminium. Un nourrisson de deux mois peut recevoir jusqu'à 1,2 mg d'aluminium via les vaccinations recommandées [57,58].

3.8. Produits cosmétiques

L'aluminium est aussi utilisé dans une variété de produits cosmétiques : crèmes, fards, fonds de teint, antitranspirants, vernis, rouges à lèvres, soins capillaires, etc. Il est généralement présent sous forme d'hydroxyde d'aluminium ou d'alumine. L'hydroxyde d'aluminium est également employé dans les produits d'hygiène buccale et les lotions de bronzage [34,59].

Des teneurs particulièrement élevées ont été mesurées dans certaines formulations, comme les fards à paupières (jusqu'à 50 000 mg/kg) ou les rouges à lèvres (jusqu'à 27 000 mg/kg). Ces données sont résumées dans le Tableau 4.

Tableau 4. Concentration d'aluminium dans certains produits cosmétiques [20].

| Produits | Teneur en aluminium (mg/kg) |
|-----------------------------------------|------------------------------------|
| Fard à paupières | 20 000–50 000 |
| Mascara | 117–20 000 |
| Rouges à lèvres | 14 2–27 032 |
| Gloss à lèvres | 0,415–10536 |
| Fond de teint, poudres compactes | 33,26–18 661,50 |
| Crèmes | 15,31–62,17 |
| Boues de la mer Morte | 4 500–7 900 |
| Crèmes pour les mains | 5 400–8 500 |
| Masques faciaux | 170–650 |
| Henné | 142,10 |
| Kohl | 56,75–1 009,30 |

4. Métabolisme de l'aluminium dans l'organisme

4.1. Absorption et biodisponibilité

La biodisponibilité de l'aluminium dépend de sa combinaison avec d'autres éléments et composants alimentaires pouvant former des complexes qui augmentent ou inhibent son absorption [60].

4.1.1. Facteurs influençant l'absorption de l'aluminium

L'absorption intestinale de l'aluminium (Al) est généralement faible, de l'ordre de 0,1 à 1 %, en raison de l'efficacité de la barrière gastro-intestinale [61]. Cette absorption dépend de :

4.1.1.1. Forme chimique de l'aluminium

L'aluminium est principalement absorbé sous sa forme trivalente (Al^{3+}), peu biodisponible dans des conditions physiologiques. Les formes complexées (ex. : citrate, lactate) sont mieux absorbées [62].

4.1.1.2. pH

Dans l'estomac acide ($pH < 5$), l'aluminium est soluble sous forme d'ion Al^{3+} hydraté ($[Al(H_2O)_6]^{3+}$). Dans l'intestin, l'augmentation du pH favorise la précipitation sous forme d'hydroxyde insoluble [63].

4.1.1.3. Présence d'autres substances

Le citrate, le fluor, le lactate ou une carence en fer augmentent l'absorption, tandis que les silicates et les phosphates la réduisent [44,46].

4.1.1.4. Site d'absorption

Des études (*Adler et Berlyne*) ont montré que l'absorption se fait majoritairement dans le duodénum, par des mécanismes à la fois passifs (23 %) et actifs, en particulier avec l' $AlCl_3$ à pH 2 [14]. Toutefois, ce pH extrêmement acide était utilisé de manière expérimentale pour maximiser artificiellement l'absorption ; physiologiquement, le pH du duodénum est plus élevé (5,5 à 7), ce qui réduit naturellement l'absorption de l'aluminium dans des conditions normales.

Un récapitulatif des facteurs influençant l'absorption est présenté dans le Tableau 5.

Tableau 5. Facteurs influençant l'absorption gastro-intestinale de l'aluminium [44].

| Facteur | Favorisant une absorption plus élevée | Réduisant l'absorption |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| pH | Acide ou alcalin | Neutre |
| Composé d'aluminium | Chlorure, nitrate, citrate, lactate | Hydroxyde d'aluminium |
| Présence d'autres substances | Citrate, fluorure, maltol, lactate | Silicate, phosphate, polyphénols, acide sialique |
| Autres facteurs | Quantité importante d'aluminium ingéré Carence en fer dans l'alimentation La carence en calcium et en magnésium | - |

4.1.2. Mécanismes d'absorption

Deux voies principales permettent l'absorption de l'aluminium [14]:

- **Voie paracellulaire** : passage passif à travers les jonctions serrées des entérocytes.
- **Voie transcellulaire** : passage à travers la cellule, par diffusion ou transport facilité/actif.

Certains éléments (phosphore, calcium, vitamine D) agissent comme chélateurs, favorisant le passage membranaire de l'aluminium, ce qui peut mener à une accumulation chronique dans le cerveau, les muscles ou les organes reproducteurs [64].

Chez les personnes atteintes d'insuffisance rénale ou de maladies inflammatoires intestinales, l'absorption peut être significativement augmentée [61,62,65].

4.1.3. Autres voies d'absorption

- **Cutanée** : L'aluminium peut traverser la peau, surtout si elle est irritée ou rasée. La peau agit comme un réservoir, libérant progressivement de l'aluminium dans la circulation systémique (Figure 2) [34,36].

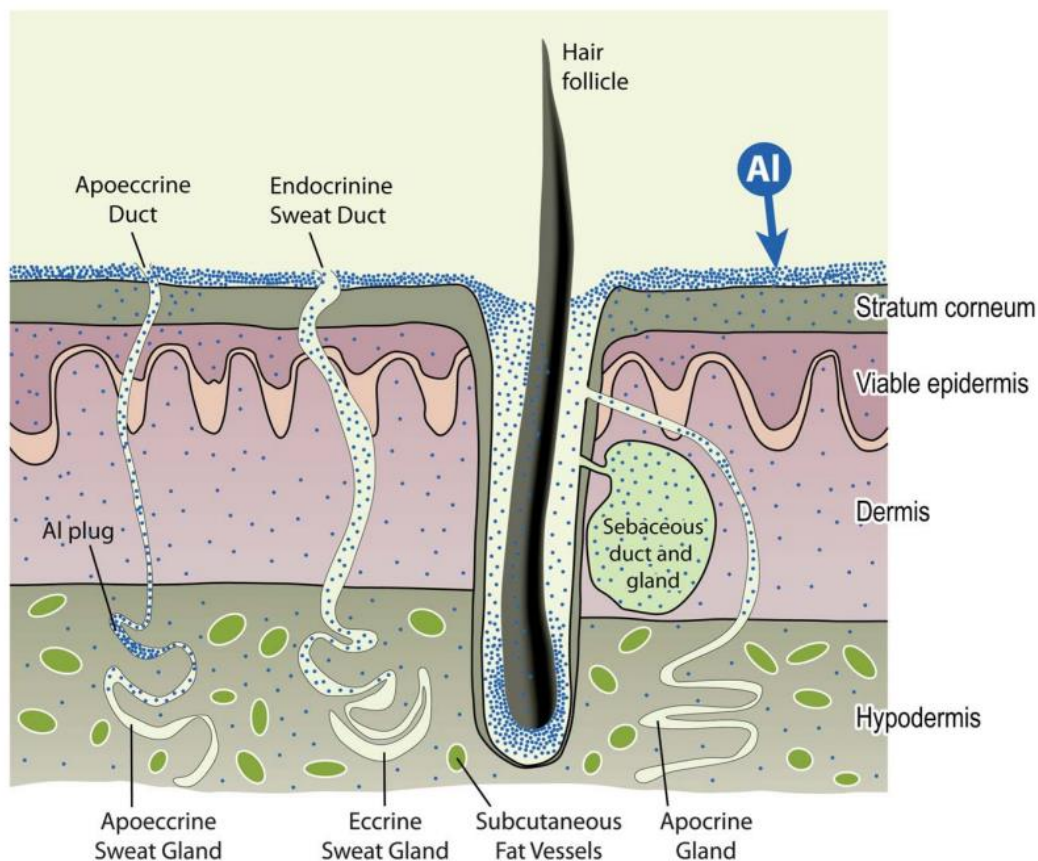


Figure 2. Mécanismes de rétention et de diffusion de l'aluminium dans les couches cutanées [36].

- **Pulmonaire** : L'exposition professionnelle (ex. : fonderies) permet une absorption directe de l'aluminium par les alvéoles pulmonaires [62].

4.2. Distribution

Une fois absorbé, l'aluminium circule principalement lié à la transferrine (environ 90 %), et en moindre proportion sous forme complexée avec le citrate, des acides aminés ou des protéines plasmatiques [60].

- **Accumulation osseuse** : Les os représentent le principal site de stockage, contenant environ 50 % de la charge corporelle totale.
- **Autres sites** : Poumons (25 %), foie, ganglions lymphatiques, tractus digestif, peau, glandes parathyroïdes et surrénales [66].
- **Cerveau** : Bien que faiblement accumulé, l'aluminium peut traverser la barrière hémato-encéphalique via la voie transferrine-récepteur ou atteindre le cerveau par le plexus choroïde. Des études ont également mis en évidence son passage transplacentaire et son excrétion dans le lait maternel [67]. (Figure 3)

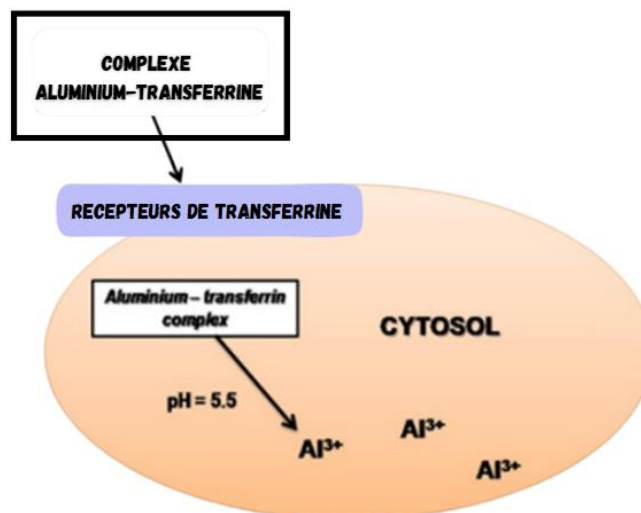


Figure 3. Voie transferrine-transferrine [42].

4.3. Métabolisme et élimination

L'aluminium libre (Al^{3+}) se lie facilement à de nombreux ligands, et sa métabolisation dépend de l'affinité avec ces derniers et du devenir métabolique des complexes formés. Il peut créer des complexes stables de faible poids moléculaire avec des acides organiques, des acides aminés, des nucléotides, des phosphates et des glucides, ainsi que des complexes macromoléculaires avec des protéines, des polynucléotides et des glycosaminoglycane [30,68].

L'élimination de l'aluminium s'effectue principalement par voie urinaire, avec une excrétion de 83 % chez les individus en bonne santé. Les concentrations urinaires varient entre 3 et 20 $\mu\text{g/L}$ selon les apports. La demi-vie d'élimination varie selon la durée d'exposition et de sa redistribution depuis les sites de stockage. L'aluminium est rapidement éliminé du compartiment sanguin, mais son élimination des compartiments de stockage, comme les os, est beaucoup plus lente [69,70].

L'élimination suit une cinétique triphasique :

- **Phase initiale (heures)** : élimination rapide du compartiment plasmatique.
- **Phase intermédiaire (semaines)** : redistribution tissulaire.
- **Phase terminale (mois à années)** : élimination lente à partir des tissus osseux.

L'aluminium non absorbé est principalement excrété par les selles. Bien qu'il soit souvent estimé que 99 % de l'aluminium ingéré sont éliminés par cette voie, une étude a montré une variation entre 74 et 96 %, remettant en question ce chiffre. La proportion exacte d'élimination fécale reste à préciser [36].

L'excrétion biliaire est minimale (< 1 %), probablement en raison de la formation de complexes de haut poids moléculaire peu diffusibles et d'un flux biliaire réduit après exposition à des doses élevées [14,34]. La figure 4 illustre les facteurs influençant l'accumulation de l'aluminium et le développement de sa toxicité.

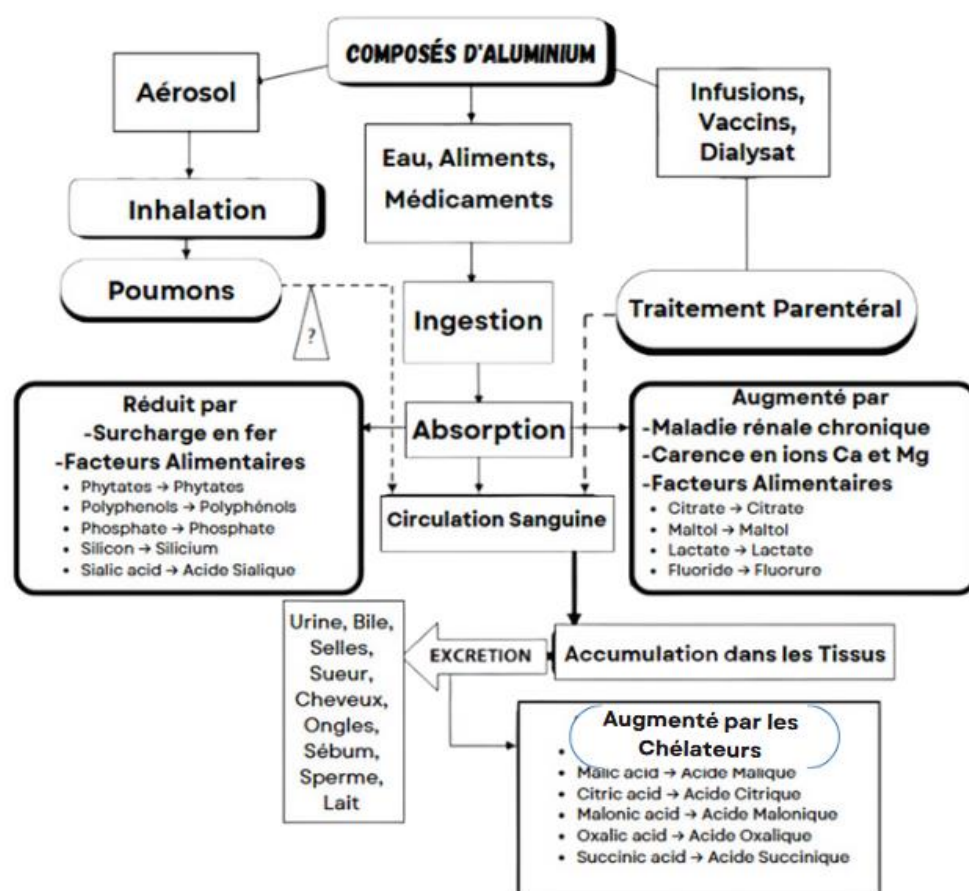


Figure 4. Facteurs influençant l'accumulation de l'aluminium dans les tissus et le développement de la toxicité [35].

4.4. Spécificités du métabolisme chez les nourrissons

Chez les nouveau-nés et les jeunes enfants, les systèmes d'absorption, de distribution et d'élimination sont immatures, ce qui augmente leur vulnérabilité à l'aluminium [71]. L'absorption est accrue par rapport aux adultes, une barrière hémato-encéphalique immature, favorise l'exposition du cerveau à l'aluminium et une immaturité enzymatique ou un déficit en certaines enzymes à la naissance modifient le métabolisme [72,73].

Les reins sont matures dès 36 semaines de conception, mais leur débit de filtration glomérulaire n'atteint le niveau adulte qu'entre 8 et 12 mois [74]. Un résumé de ces spécificités est présenté dans le Tableau 6.

Tableau 6. Spécificités des processus d'absorption, distribution, métabolisme et excrétion chez les nouveau-nés, nourrissons et les prématurés [75].

| Paramètre | Nouveau-né / Nourrisson | Prématuré |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Absorption | <ul style="list-style-type: none"> - Dépend du pH, de la flore intestinale, et de la vidange gastrique. - Tétées concomitantes influencent l'absorption. | <ul style="list-style-type: none"> - Absorption accrue par rapport aux adultes. - Vidange gastrique prolongée par rapport à l'adulte, entraînant une augmentation de l'absorption gastrique. |
| Distribution | <ul style="list-style-type: none"> - Dépend de leur liaison aux protéines circulantes. - Dépend de paramètres physiologiques, notamment de l'eau corporelle totale. | <ul style="list-style-type: none"> - Disponibilité des sites de liaison réduite (affinité et capacité d'albumine diminuées). |
| Métabolisme | <ul style="list-style-type: none"> - L'expression des enzymes de métabolisme des xénobiotiques augmente après la naissance. | <ul style="list-style-type: none"> - Immaturité des récepteurs métaboliques et des fonctions hépatiques entraînant une diminution de la clairance. - Risque très élevé de toxicité significative dû à une capacité réduite de métabolisme hépatique et excréteur. |
| Excrétion | <ul style="list-style-type: none"> - Capacité de filtration rénale équivalente à 1/3 de celle d'un adulte. | <ul style="list-style-type: none"> - Les substances éliminées principalement par clairance rénale auront une demi-vie prolongée chez les prématurés (risque de toxicité plus élevé) |

5. Toxicité et effets de l'aluminium sur la santé

5.1. Mécanismes de toxicité

L'aluminium est un métal sans rôle physiologique connu chez l'humain. Bien qu'il soit omniprésent dans l'environnement, il peut induire une toxicité systémique lorsqu'il s'accumule dans l'organisme [35,65].

Aucun besoin biologique en aluminium n'a été démontré, et aucune maladie due à une carence en aluminium n'a été identifiée [65].

5.1.1. Neurotoxicité

Environ 90 % de l'aluminium absorbé dans le sang se lie à la transferrine, facilitant son passage à travers la barrière hémato-encéphalique via une endocytose médiée par les récepteurs de la transferrine [76]. Le reste circule sous forme de citrate d'aluminium, capable de traverser également cette barrière ou d'atteindre le cerveau via l'épithélium et le nerf olfactifs.

Une fois dans le tissu cérébral, l'aluminium peut :

- Provoquer des dégénérescences neurofibrillaires, semblables à celles observées dans la maladie d'Alzheimer ;
- Inhiber la dégradation des plaques amyloïdes ;
- Favoriser la phosphorylation de la protéine Tau, altérant la structure neuronale ;
- Inhiber l'acétylcholinestérase, réduisant la neurotransmission ;
- Perturber le métabolisme énergétique en inhibant la glycolyse et le cycle de Krebs [76,77].

Pour mieux illustrer les voies de distribution de l'aluminium dans l'organisme et ses cibles neurologiques, la Figure 5 présente un schéma décrivant son passage dans les différents compartiments biologiques, notamment le plasma, le cerveau et les cellules.

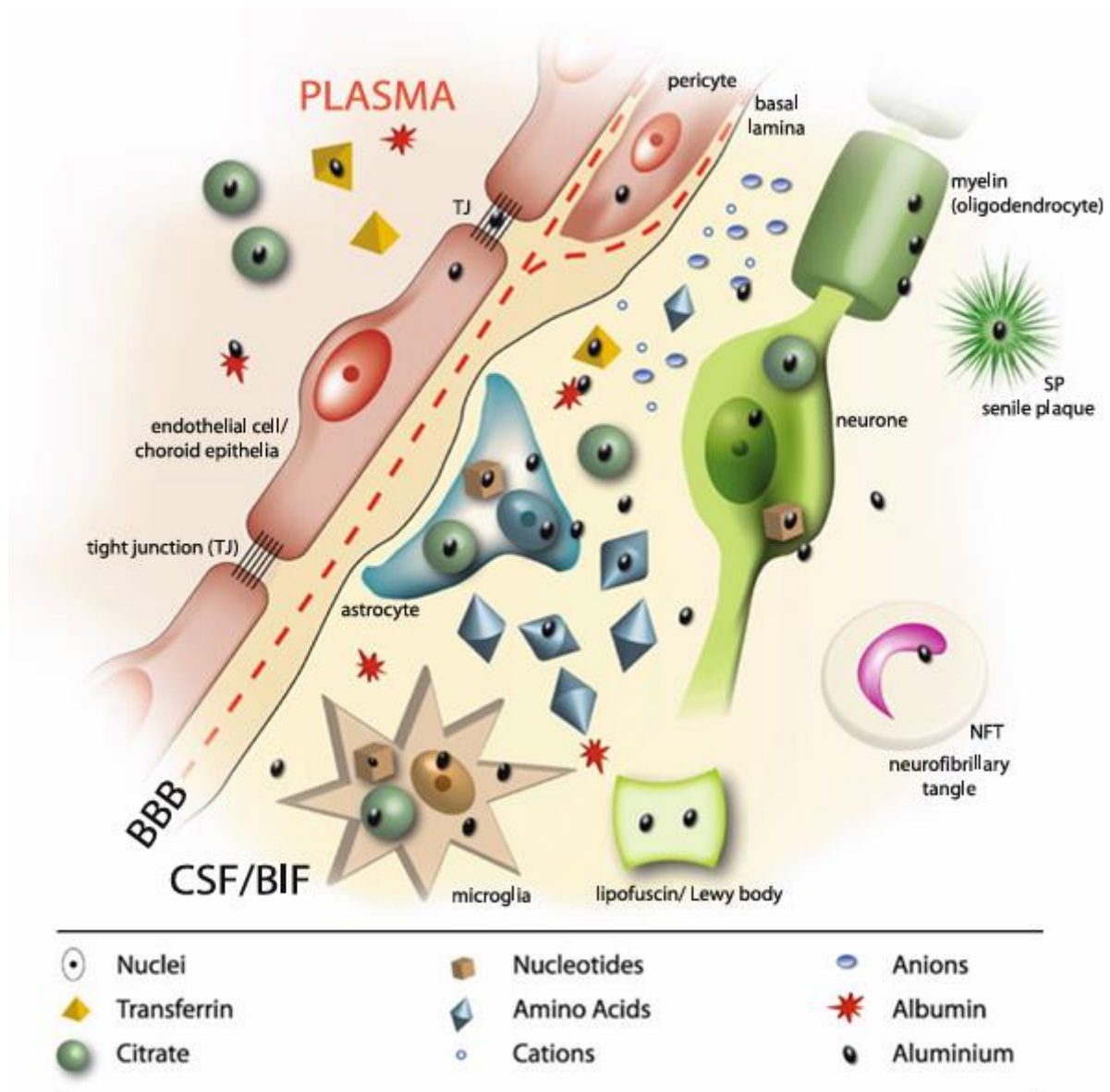


Figure 5. Schéma représentant la distribution possible de l'aluminium dans le plasma, la barrière hémato-encéphalique (BHE), le liquide céphalo-rachidien (LCR), le liquide interstitiel cérébral, ainsi que dans les compartiments cellulaires et pathologique [78].

L'aluminium agit comme un élément neurotoxique perturbant le métabolisme cérébral en affectant plusieurs systèmes, ce qui altère la fonction neuronale et entraîne leur mort progressive [79]. Il exacerbe les faiblesses cellulaires en rivalisant avec d'autres métaux essentiels et peut initier ou aggraver des maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer et la sclérose en plaques, favorisant leur apparition précoce ou leur progression rapide.

Une fois présent dans le cerveau, l'aluminium s'accumule dans des structures pathologiques telles que les plaques séniles et les corps de Lewy. Ces dernières vont laisser des traces visibles de maladies neurodégénératives sans possibilité d'élimination naturelle [19].

5.1.2. Développement du stress oxydatif chronique

L'exposition prolongée à l'aluminium déclenche une activation de l'inflammasome NLRP3, avec libération d'interleukines pro-inflammatoires (IL-1 β , IL-8, IL-18) et de signaux de danger (DAMPs) tels que l'ADN ou l'acide urique. Cette réponse favorise :

- Une activation chronique des lymphocytes T,
- Un stress oxydatif mitochondrial,
- et des dommages cellulaires persistants [80].

Le radical superoxyde d'aluminium (AlO₂²⁺), proposé comme mécanisme pro-oxydant, pourrait amplifier les oxydations biologiques (NADH, lipides) et aggraver les dommages via la réaction de Fenton [81].

5.2. Effets pathologiques associés à l'exposition à l'aluminium

5.2.1. Trouble du Spectre Autistique (TSA)

Les facteurs génétiques ne pouvant à eux seuls expliquer la majorité des cas d'autisme, l'attention se porte de plus en plus sur les facteurs environnementaux et leur rôle potentiel dans le développement de ce trouble. Les métaux toxiques tels que l'aluminium (Al), le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le chrome (Cr), l'arsenic (As) et le mercure (Hg) sont particulièrement impliqués [65].

Des études suggèrent que les enfants atteints de TSA présentent une capacité réduite à éliminer les métaux toxiques, entraînant leur accumulation et aggravant les symptômes [82,83].

- *Tomljenovic et al. (2011)* ont établi une corrélation entre l'utilisation d'adjuvants à base d'aluminium dans les vaccins et la prévalence des TSA, notamment entre 3 et 4 mois, période critique du développement cérébral [84].
- Une étude menée à Kuala Lumpur en 2023 a identifié des taux urinaires élevés d'aluminium (>1,60 $\mu\text{g/dL}$) comme facteur de risque de TSA chez les enfants d'âge préscolaire [85].
- L'étude de *Sulaiman et al. (2020)* a révélé une association positive significative entre les niveaux d'aluminium (Al) mesurés dans les cheveux et l'urine d'enfants atteints de troubles du spectre autistique (TSA) [86].

- *Mold et al. (2018)* ont observé de fortes concentrations d'aluminium dans les tissus cérébraux de donneurs atteints de TSA, localisées dans les neurones, les cellules gliales et immunitaires [18]. (Figure 6)

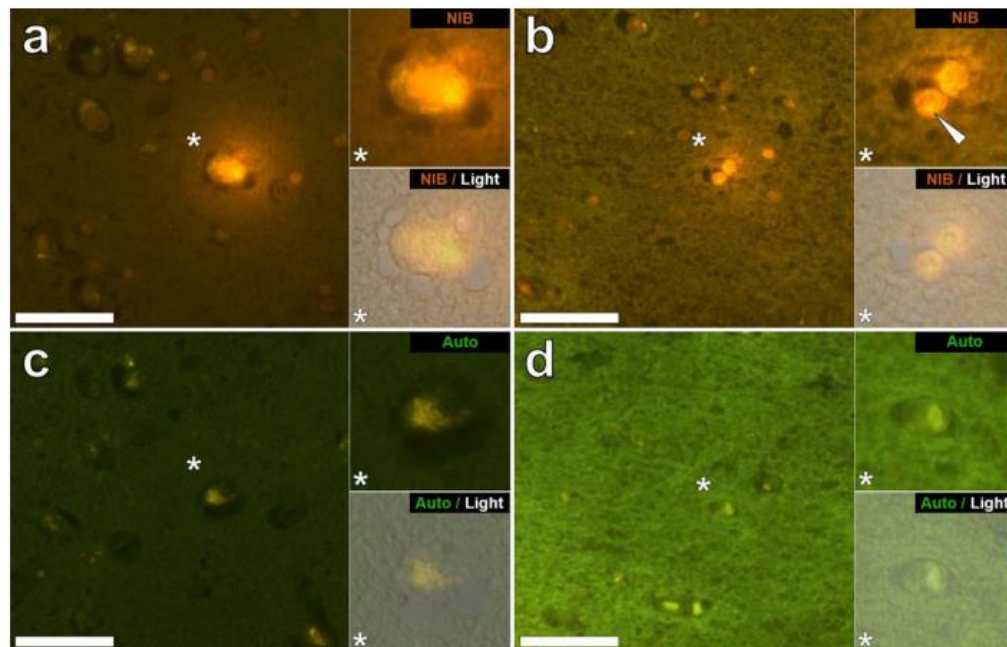


Figure 6. « Aluminium - réactif au Lumogallion » dans des cellules neuronales et gliales probables au niveau du lobe temporal et de l'hippocampe chez un donneur de 14 ans (A10) diagnostiqué avec un trouble du spectre autistique [18].

(a) L'aluminium intraneuronal dans le lobe temporal a été identifié par une fluorescence orange, co-localisée avec la lipofuscine, révélée par une fluorescence jaune dans une section en autofluorescence non colorée (5 mm) (c). (b) Une fluorescence orange ponctuée intracellulaire (flèche blanche) a été observée dans des cellules gliales de l'hippocampe, produisant une émission verte en autofluorescence dans une section non colorée (d).

Les panneaux supérieurs et inférieurs montrent des agrandissements marqués par des astérisques, avec des superpositions de canaux de fluorescence et en champ clair. Grossissement $\times 400$, barres d'échelle : 50 μm .

Ces données renforcent l'hypothèse d'un lien entre exposition précoce à l'aluminium et développement des TSA, bien qu'un consensus scientifique n'ait pas encore été atteint [87,88].

5.2.2. Maladie d'Alzheimer (MA)

Des concentrations élevées d'aluminium ont été observées dans les plaques séniles des lobes temporal et hippocampique chez les patients atteints de MA, comparativement aux individus non déments [74]. *Virginie Rondeau (2000)*, a constaté que des niveaux élevés d'aluminium dans l'eau potable ($\geq 0,1$ mg/litre) sont associés à un risque accru de maladie d'Alzheimer, (RR ajusté = 1,95, $p = 0,004$) [90]. *Exley et Vickers (2014)*, ont rapporté le cas d'une analyse

approfondie réalisée sur environ 20 g de tissu cérébral provenant du lobe frontal d'un individu exposé professionnellement à l'aluminium pendant 8 ans, révélant une accumulation significative d'aluminium (2,98 µg/g poids sec), soit plus de trois fois supérieure à celle observée dans des études antérieures. Ces résultats suggèrent un lien potentiel entre cette exposition et le développement de la maladie d'Alzheimer [91].

5.2.3. Sclérose en plaque (SEP)

Une étude de 2018 a révélé des niveaux élevés d'aluminium dans les localisations intracellulaires et extracellulaires du cerveau de 14 patients atteints de SEP. *Linhart et al.* ont comparé les concentrations d'Al dans les cerveaux de patients atteints de SEP et de témoins sains, montrant une accumulation significativement plus élevée chez les patients atteints de SEP [44]. *Exley et al. (2019)* ont également constaté les mêmes résultats, ils ont pu détecter de l'aluminium dans des plaques et des corpuscules amyloïdes ce qui indique son implication potentielle dans la progression de la sclérose en plaques [92].

5.2.4. Maladie de Parkinson (MP)

L'aluminium s'accumule dans la substance noire et les corps de Lewy, et perturbent le système dopaminergique en affectant les enzymes de la voie de biosynthèse de la dopamine. L'exposition à l'aluminium, notamment dans des environnements professionnels ou via des produits comme les antiacides, est un facteur de risque important pour la maladie de Parkinson. Les études montrent que l'exposition professionnelle à l'aluminium double le risque de MP. Par exemple, une cohorte de 37 000 mineurs en Ontario a révélé que l'exposition respiratoire à la poussière d'aluminium augmentait l'incidence de la MP de 30 % [44]. *Capriotti et Terzakis (2016)*, indiquent que l'accumulation de métaux neurotoxiques dans le cerveau pourrait perturber le métabolisme dopaminergique et favoriser l'agrégation de l' α -synucléine, un facteur clé de la maladie de Parkinson [93].

5.2.5. Encéphalopathie de dialyse

Ce syndrome survient chez les patients en insuffisance rénale soumis à une dialyse chronique, en raison de l'accumulation d'aluminium provenant du fluide de dialyse dans la matière grise du cerveau des patients. Les symptômes incluent des troubles de l'élocution, des tremblements, des pertes de mémoire et des crises, évoluant rapidement vers un coma et une issue fatale en l'absence de traitement [94]. Des lésions spongieuses ont été observées dans les couches supérieures du cortex cérébral et les corps cellulaires neuronaux. Les études ont révélé que la concentration d'aluminium reste élevée jusqu'à quatre ans après une transplantation rénale [44].

Selon *Cannata-Andia et al. (1998)* [69], la concentration en aluminium dans l'eau utilisée pour la dialyse devrait se situer entre 2 et 3 µg/L pour éviter une surexposition des patients.

5.2.6. Malformations congénitales

L'aluminium a des effets génotoxiques en inhibant la prolifération et la différenciation cellulaires. Il est également lié à des processus métastatiques, notamment dans le cancer du sein, via l'activation des métalloprotéinases de la matrice (MMP9 et MMP14).

Chez de très jeunes animaux exposés à de fortes doses d'aluminium pendant la portée et l'allaitement, des effets tels que faiblesse, diminution de l'activité, troubles de la coordination et altération de la mémoire ont été observés, similaires à ceux constatés chez les animaux adultes.

Il n'existe toutefois aucune indication que les enfants soient plus sensibles à l'aluminium que les animaux adultes [22]. Les nourrissons les plus à risque seraient les prématurés ayant une fonction rénale altérée, car leur capacité à excréter l'aluminium absorbé est réduite [50].

5.2.7. Démence

Une étude longitudinale menée en Ecosse explorait l'association entre les niveaux d'aluminium et de fluor dans l'eau potable et le risque de démence. Les résultats ont montré que des concentrations accrues d'aluminium augmentaient le risque de démence chez les hommes et les femmes tandis que le fluor présentait une relation dose-dépendante, avec un risque plus que doublé dans le quartile le plus élevé. Même à des niveaux considérés comme sûrs selon les directives internationales, l'aluminium et le fluor dans l'eau potable pourraient augmenter le risque de démence [95].

Shaw et Petrik (2009) ont démontré que des injections d'hydroxyde d'aluminium chez la souris entraînaient une dégénérescence des neurones moteurs ainsi que des altérations cognitives et comportementales. L'étude a révélé une accumulation d'aluminium dans le cytoplasme des neurones moteurs, une augmentation de l'apoptose neuronale et des marqueurs neuro-inflammatoires, ainsi que la présence de protéines tau hyperphosphorylées, caractéristiques des maladies neurodégénératives comme certaines démences fronto-temporales [96].

Foster (2005), révèle que l'aluminium est omniprésent dans l'environnement (eau potable, alimentation industrielle, cosmétiques, vaccins) et qu'il détruit progressivement les neurones [97].

5.2.8. Cancer du sein

L'application topique d'antitranspirants contenant de l'aluminium sous les aisselles provoque une accumulation immédiate et élevée d'aluminium à la surface de la peau [68,98].

P.D. Darbre a mené une étude sur les effets des sels d'aluminium, utilisés dans les antitranspirants, sur le développement du cancer du sein. Les résultats montrent que l'aluminium agit comme un "métalloestrogène", interférant avec les récepteurs aux œstrogènes des cellules mammaires humaines (MCF7), ce qui pourrait influencer les voies de signalisation impliquées dans la carcinogenèse mammaire [99].

5.2.9. Os/cartilage

L'aluminium augmente l'activité des ostéoclastes et réduit celle des ostéoblastes. L'une des principales conséquences de cette action est l'ostéomalacie, observée chez les patients atteints d'insuffisance rénale chronique exposés à l'aluminium via l'eau potable ou les dialysats contaminés [99].

L'aluminium interfère également avec le métabolisme de la vitamine D, en inhibant la 1α -hydroxylase, une enzyme clé dans la transformation de la vitamine D en sa forme active. Cette inhibition entraîne une réduction de l'absorption intestinale du calcium. Au niveau du cartilage, l'aluminium perturbe les voies de signalisation BMP-2 (Bone Morphogenetic Protein-2) et TGF- β 1 (Transforming Growth Factor Beta-1), essentielles à la formation et au remodelage du cartilage. Cette altération peut contribuer potentiellement à des maladies dégénératives comme l'arthrose [100].

5.2.10. Maladies inflammatoires de l'intestin

L'aluminium s'accumule dans les plaques de Peyer et les tissus lymphoïdes intestinaux, augmente l'expression des cytokines pro-inflammatoires telles que IL- 1β et IL-17A et favorise une hyperactivation du système immunitaire intestinal, entraînant une réponse inflammatoire chronique [101,102].

Des niveaux élevés d'aluminium dans l'intestin peuvent stimuler une réponse auto-immune avec exacerbation des pathologies inflammatoires intestinales telles que la maladie de Crohn et la rectocolite hémorragique [94].

Tableau 7. Exposition à l'aluminium et santé humaine : quelques preuves épidémiologiques [80,103].

| Auteur(s) | Année | Etude | Impact de l'aluminium |
|---------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rondeau et al. | 2009 | Etude longitudinale française sur l'aluminium et les troubles cognitifs | L'exposition élevée à l'aluminium dans l'eau potable augmente significativement le risque de troubles cognitifs légers et de maladie d'Alzheimer. |
| Agmon-Levin et al. | 2009 | Syndrome auto-immun induit par les adjuvants (ASIA) | L'exposition aux adjuvants à base d'aluminium peut provoquer des maladies auto-immunes et inflammatoires chez les individus génétiquement prédisposés. |
| Kawahara et Kato-Negishi | 2011 | Analyse des effets de l'aluminium sur les pathologies cérébrales | L'aluminium inhibe la déphosphorylation de la protéine tau, favorise les enchevêtrements neurofibrillaires et les plaques amyloïdes. |
| Voineagu et al. | 2011 | Etude post-mortem sur des gènes exprimés différemment chez des enfants atteints de TSA | Montre des altérations dans l'expression des gènes liés aux fonctions immunitaires et gliales, potentiellement dues à des facteurs environnementaux. |
| Melnyk et al. | 2012 | Oxydation de l'ADN et hypométhylation globale chez des enfants atteints de TSA | Signale un dommage oxydatif accru et des anomalies épigénétiques spécifiques au TSA. |
| Yasuda et Tsutsui | 2013 | Étude des niveaux d'aluminium dans les cheveux et l'urine d'enfants atteints de TSA | Montre des niveaux élevés d'aluminium chez les enfants TSA par rapport aux témoins sains. |
| Shaw et Tomljenovic | 2013 | Corrélation entre les adjuvants à base d'aluminium et la prévalence des TSA | Association positive significative entre l'exposition aux adjuvants à base d'aluminium et l'augmentation de la prévalence des troubles du spectre autistique (TSA). |
| Zhao et al. | 2014 | Etude sur les mécanismes de l'aluminium dans la formation des plaques amyloïdes | L'aluminium favorise l'agrégation de peptides A β 42 et réduit l'activité microgliale, ce qui perturbe l'élimination des plaques amyloïdes. |

| Suite tableau. 7 | | | |
|-----------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Auteur(s) | Année | Etude | Impact de l'aluminium |
| Zhubi et al. | 2014 | Analyse des troubles du spectre autistique (TSA) | Identifie des troubles de l'interaction sociale et des comportements stéréotypés comme caractéristiques du TSA. |
| Wong et al. | 2014 | Analyse des profils de méthylation de l'ADN chez des jumeaux monozygotes discordants pour le TSA | Identifie des variations épigénétiques corrélées à la sévérité des traits autistiques, soulignant l'importance des facteurs épigénétiques. |
| Morris et Berk | 2015 | Recherche sur les adjuvants à base de sels d'aluminium | Identifie l'aluminium comme un facteur déclenchant potentiel des pathologies auto-immunes. |
| Wang et al. | 2016 | Méta-analyse sur l'exposition à l'aluminium et le risque de maladie d'Alzheimer | Conclut que l'exposition accrue à l'aluminium augmente de 71 % le risque de développer la maladie d'Alzheimer. |
| Jean-Philippe Klein et al. | 2023 | Étude sur l'impact de l'aluminium sur la fertilité masculine et la fragmentation de l'ADN spermatique | L'aluminium présent dans le sperme ne semble pas augmenter la fragmentation de l'ADN des spermatozoïdes, mais il pourrait contribuer à la baisse de la fertilité masculine mondiale en tant que facteur environnemental. |
| Exley et al. | 2023 | Rôle de l'aluminium dans les tumeurs | Aluminium retrouvé dans les tissus tumoraux, suggérant un rôle possible dans l'initiation ou l'aggravation des tumeurs mammaires. |

6. Méthodes de dosage de l'aluminium

La détermination de l'aluminium dans diverses matrices (eau, aliments, tissus biologiques) requiert des méthodes analytiques sensibles, spécifiques et adaptées aux niveaux de concentration généralement faibles. Les techniques utilisées varient selon la nature de l'échantillon, les objectifs de l'analyse, les moyens disponibles, et le degré de précision attendu.

6.1. Spectrométrie d'absorption atomique (SAA)

6.1.1. Spectrométrie d'absorption atomique par flamme

Dans cette technique, l'échantillon est introduit dans une flamme où il est atomisé. Un faisceau lumineux traverse la flamme, passe par un monochromateur, puis atteint un détecteur qui mesure la lumière absorbée par l'élément atomisé. La quantité de lumière absorbée à une longueur d'onde spécifique est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon, dans une plage de concentrations bien définie. Une courbe d'étalonnage sera tracée puis les concentration en aluminium des échantillons sera déterminée en fonction de cette courbe (Figure 7) [104,105].

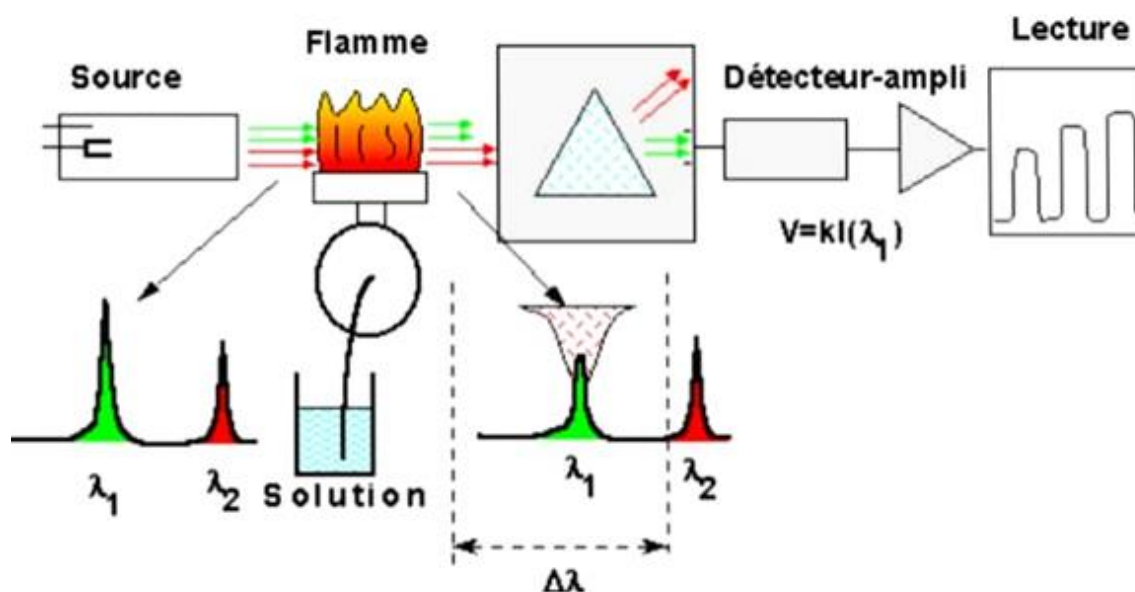


Figure 7. Principe du spectrophotomètre d'absorption atomique [106].

6.1.2. Spectrométrie d'absorption atomique électrothermique (Four graphite)

La spectroscopie d'absorption atomique électrothermique repose sur le même principe que l'atomisation directe par flamme, mais utilise un atomiseur électriquement chauffé entre 2 100 à 2 600 °C, ou four en graphite, à la place du brûleur standard. Un volume discret d'échantillon

est introduit dans un tube échantillon en graphite. L'analyse est généralement réalisée en plusieurs étapes de chauffage :

- **Séchage** : Un faible courant chauffe le tube pour évaporer l'eau de l'échantillon.
- **Carbonisation** : Une température intermédiaire détruit la matière organique et volatilise les composants de la matrice.
- **Atomisation** : Un courant plus élevé chauffe le tube jusqu'à incandescence, dans une atmosphère inerte, pour atomiser l'élément à analyser [104,105].

6.2. Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS)

La spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) est une méthode sensible et précise pour la détermination de l'aluminium. Le principe repose sur l'ionisation de l'aluminium dans un plasma d'argon à haute température, qui excite les atomes. Ces atomes émettent des radiations détectées par un spectromètre de masse, permettant ainsi l'analyse quantitative de l'aluminium. Les ions sont ensuite séparés et détectés en fonction de leur rapport masse/charge [105,107,108].

6.3. Microsonde laser couplée à la spectrométrie de masse (LMMS ou LAMMA)

Cette méthode utilise un faisceau pulsé de photons pour évaporer une infime quantité d'échantillon (1 pg) sur une région de l'ordre de 1 μm , ce qui permet une analyse précise à l'échelle cellulaire. Elle offre une limite de détection $\leq 1 \mu\text{g/g}$ [69].

6.4. Activation neutronique (INAA)

Cette technique est basée sur l'activation de l'échantillon avec des neutrons pour mesurer le rayonnement alpha. Toutefois, elle manque de spécificité, car les radiations mesurées peuvent provenir de plusieurs éléments, comme le phosphore, rendant l'interprétation des résultats complexe [69].

6.5. Méthodes de spectrophotométrie UV-Visible

Ces méthodes sont employées surtout pour le dosage de l'aluminium dans l'eau.

6.5.1. Méthode spectrophotométrique avec l'Eriochrome Cyanine R

En présence du colorant Eriochrome cyanine R, des solutions d'aluminium tamponnées à un pH de 6,0 forment un complexe de couleur rouge à rose qui présente une absorption maximale à 535 nm. L'intensité de cette coloration est proportionnelle à la concentration de l'aluminium dans l'échantillon [109–111].

6.5.2. Méthode spectrophotométrique au rouge d'alizarine S

La méthode repose sur la réaction colorimétrique entre le rouge d'Alizarine S et les ions aluminium (Al^{3+}) en milieu tamponné à pH 4,5. Cette réaction produit un complexe coloré rose,

dont le maximum d'absorption est mesuré par spectrophotométrie UV-visible à 510 nm [112,113]. Le Tableau 8 présente une synthèse des principales méthodes employées pour le dosage de l'aluminium.

Tableau 8. Synthèse des principales méthodes utilisées pour le dosage de l'aluminium
[60,104,105,108,109,113,114].

| Méthodologie | LDM ($\mu\text{g/L}$) | Interférences / Commentaires |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif | 2,2 | Interférences de la matrice : calcium, magnésium, sodium ($> 125 \text{ mg/L}$) et silice ($> 250 \text{ mg/L}$) [60]. |
| Spectrométrie d'émission atomique de masse à plasma à couplage inductif | 20 | Interférences de la matrice : solides dissous totaux $> 0,2 \%$ poids /Volume [104]. |
| Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif | 1 (balayage), 1,7 (ionique) | Interférences : solides dissous totaux $> 0,2 \%$ poids/volume [104]. |
| Spectrométrie d'absorption atomique au four graphite | 7,8 | L'acide chlorhydrique provoque des interférences via les ions chlorures [104]. |
| Spectrométrie d'absorption atomique à flamme directe ou par extraction | 100 | Adaptée pour des teneurs $< 900 \mu\text{g/L}$; interférences : fer $> 10 \text{ mg/L}$ [60,109]. |
| Spectrométrie d'absorption atomique électrothermique | 3 | Non spécifié [105]. |
| Spectrométrie d'émission atomique de masse à plasma à couplage inductif | 40 | Interférences : solides dissous totaux $> 1 500 \text{ mg/L}$ [105]. |
| Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif | 0,03 | Interférences : solides dissous totaux $> 0,5 \%$ poids/volume [104,108]. |
| Méthode colorimétrique avec l'Eriochrome Cyanine R à 535 nm et pH 6 | 6 | Fluorures et phosphates provoquent des interférences ; des corrections peuvent être nécessaires [109]. |
| Méthode colorimétrique avec* le violet de pyrocatechol (580 nm) | 07-10 | Non spécifié [114]. |
| Méthode colorimétrique avec le rouge d'Alizarine S et le surfactant PVP (510 nm) | 5 | Interférences : Cu^{2+} et Fe^{3+} à fortes concentrations corrigées avec l'acide ascorbique et l'L. Histidine [113]. |
| Méthode colorimétrique. Coloration rouge obtenue entre l'aluminon et les sels d'aluminium en milieu acétique | 20 | Interférences : fluorures, phosphates, sulfites ($>10 \text{ mg/L}$) et chlore résiduel ; nécessité de conditions strictes (pH, réactifs constants, température) [105]. |

LDM : Limite de Détection Minimale.

7. Apports en aluminium selon l'âge et valeurs limites d'exposition

7.1. Adultes et ingestion d'aluminium

Selon des données britanniques, les adultes, et en particulier les personnes âgées, présentent les apports alimentaires en aluminium les plus élevés, atteignant en moyenne 1,14 mg/kg de poids corporel par semaine [61].

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime l'ingestion hebdomadaire moyenne entre 11 et 36 mg, mais celle-ci peut grimper jusqu'à 286,8 mg chez les consommateurs réguliers de produits contenant des additifs à base d'aluminium (SIN 523, SIN 541 et SIN 554) [61,70]. Ces niveaux excèdent souvent les seuils de sécurité recommandés.

7.2. Enfants et ingestion d'aluminium

Chez les enfants, l'exposition est proportionnellement plus élevée en raison de leur faible poids corporel. En Chine, des études rapportent une ingestion moyenne de 3,27 mg/kg/semaine, soit plus du triple de la limite hebdomadaire tolérable fixée pour les adultes [63,115]. Les nourrissons, notamment ceux alimentés exclusivement avec des formules infantiles, sont particulièrement vulnérables :

- L'exposition via les laits infantiles varie de 200 à 600 µg/jour à 6 mois, en accord avec les estimations de l'EFSA ;
- L'eau utilisée pour la reconstitution peut constituer une source supplémentaire non négligeable d'aluminium [116].

7.3. Valeurs limites d'exposition

Le comité mixte d'experts FAO/OMS sur les additifs alimentaires (JECFA) a mené de nombreuses évaluations sur la sécurité de l'aluminium en tenant compte de toutes les voies possibles d'exposition à cette substance dans l'organisme et des effets toxiques qui en résultent. Afin de tenir en compte de l'accumulation de l'aluminium dans l'organisme et sa demi-vie particulièrement longue, l'EFSA et le JECFA ont opté pour l'établissement d'une dose hebdomadaire tolérable (DHT) plutôt qu'une dose journalière tolérable (DJT) [38,61].

En 1988, le Comité mixte FAO/OMS d'experts des additifs alimentaires (JECFA) a fixé une Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire (DHTP) de 0-7 mg/Kg de poids corporel par semaine.

En 2007, à la lumière de nouvelles études toxicologiques, cette valeur a été réévaluée, une nouvelle DHTP a été fixée à 0-1 mg/Kg de poids corporel par semaine. En 2008, l'EFSA (autorité européenne de sécurité des aliments) a défini une Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) pour l'aluminium de l'ordre de 1 mg/Kg de poids corporel.

En 2011, le JECFA a fixé un nouveau niveau provisoire de sécurité hebdomadaire à 2 mg/Kg de poids corporel par semaine. Ces recommandations ne s'appliquent pas aux enfants de moins d'un an, dont les fonctions métaboliques et rénales sont encore immatures, les rendant incapables d'éliminer efficacement l'aluminium [7,115].

L'évolution chronologique des valeurs limites est illustrée dans la Figure 8.

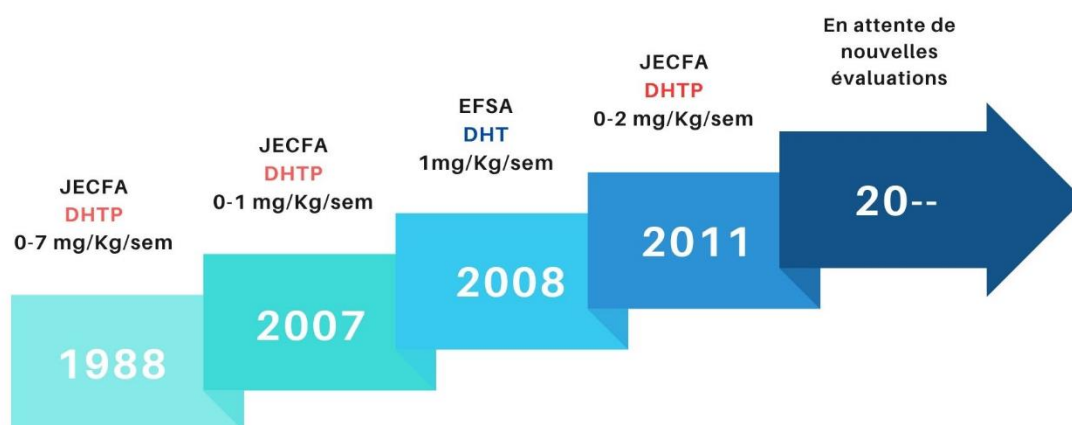


Figure 8. Evolution des limites tolérables pour l'aluminium [7,115].

CHAPITRE II

Alimentation infantile

1. Historique des préparations pour nourrissons (PPN)

Dans l'Antiquité et au Moyen Âge, les nourrices constituaient la principale alternative au lait maternel. A défaut, les mères recouraient à des substituts artisanaux, tels que du lait d'animaux (vache, chèvre), parfois épaissi avec du pain.

Au XVIII^e siècle, les premières tentatives de fabrication de substituts apparaissent, mais restent rudimentaires et souvent inadaptées, provoquant des taux élevés de morbidité et de mortalité infantile. Une avancée majeure intervient en 1867, lorsque *Justus von Liebig* met au point la première formule commerciale pour nourrissons : *Liebig's Food for Infants*, à base de farine de blé, lait de vache, farine de malt et bicarbonate de potassium. Dès 1883, le marché compte déjà 27 marques de formules brevetées. A la fin du XIX^e siècle, des mesures d'hygiène telles que la pasteurisation sont introduites pour réduire les risques de contamination.

Au début du XX^e siècle, l'industrialisation et les progrès en biochimie révèlent l'écart entre lait maternel et lait de vache, justifiant l'adjonction d'eau et de glucides pour améliorer la tolérance des nourrissons. En 1920, le biochimiste *Casimir Funk* introduit le terme "vitamines" pour désigner les composés essentiels à la prévention de maladies comme le béribéri, le scorbut ou le rachitisme.

En 1927, les laits évaporés gagnent en popularité grâce à leur prix modéré et leur facilité de conservation. A partir des années 1950, les formules enrichies en vitamines et minéraux se généralisent.

Depuis les années 1970, la recherche nutritionnelle a conduit à l'élaboration de formules spécialisées (hypoallergéniques, pour prématurés, etc.), répondant aux besoins particuliers de certains nourrissons [117–119].

La Figure 9 illustre les principaux événements qui ont marqué le développement des préparations pour nourrissons, depuis la révolution industrielle jusqu'à aujourd'hui [120].

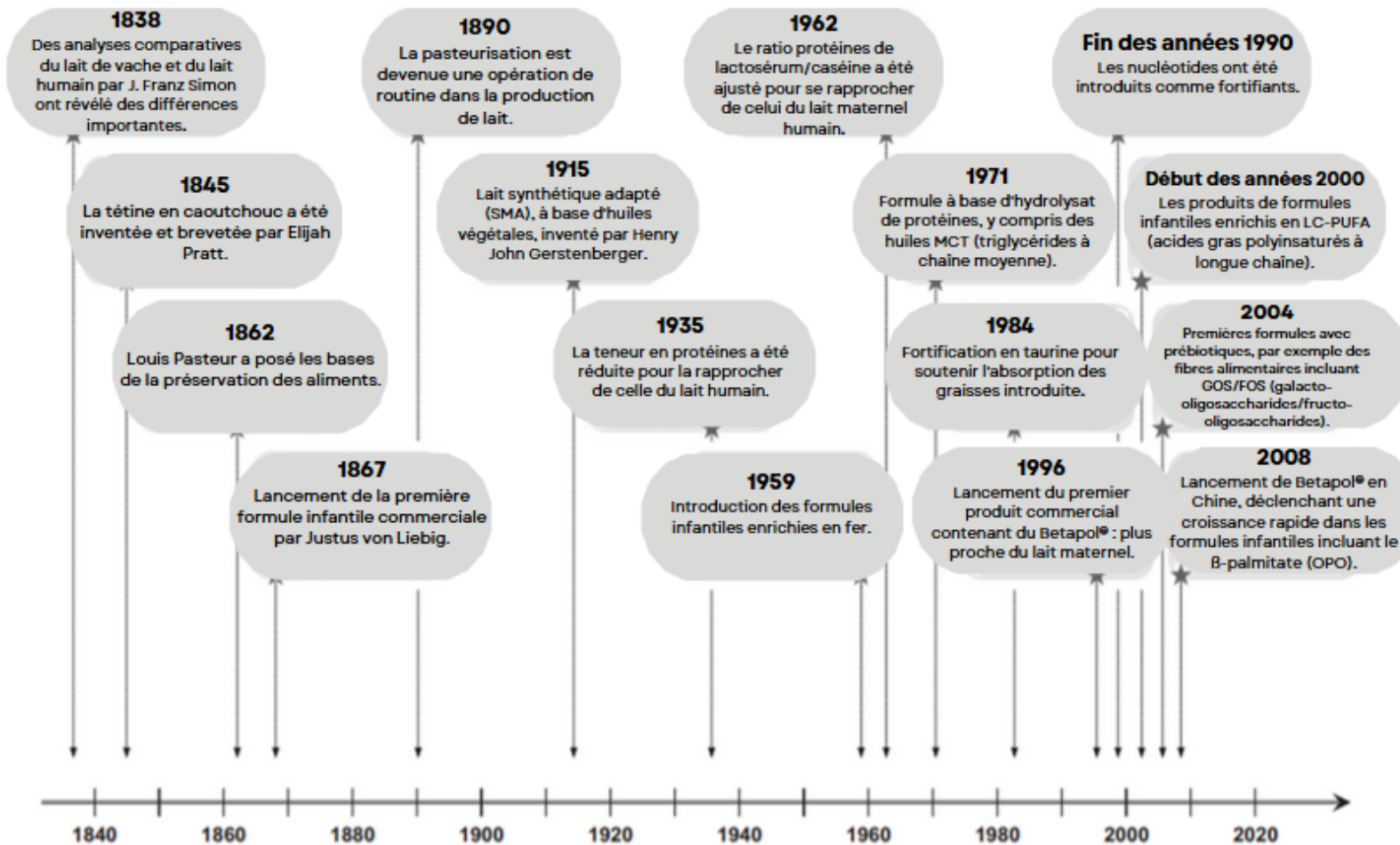


Figure 9. Evénements clés dans le développement des préparations pour nourrissons, de la révolution industrielle à nos jours [120].

2. Définitions

2.1. Préparation destinée aux nourrissons

Selon la Commission du Codex Alimentarius (1981), il s'agit d'un substitut du lait maternel, spécialement formulé pour satisfaire à lui seul les besoins nutritionnels des nourrissons pendant les premiers mois de vie, jusqu'à l'introduction d'une alimentation complémentaire [21,121].

2.2. Nourrisson

On entend par « nourrissons » les enfants de moins de 12 mois selon le Codex. L'Agence européenne du médicament (EMA) étend cette définition jusqu'à 24 mois [75].

2.3. Lait maternel

Sécrété par les glandes mammaires, il évolue en composition au fil du temps, parfois même entre deux tétées, pour s'adapter aux besoins du nourrisson. Il contient des nutriments, des anticorps, un microbiote spécifique, et contribue au développement du microbiome intestinal et de l'immunité [75,122].

2.4. Transition alimentaire

Introduction progressive d'aliments solides, recommandée à partir de 6 mois par l'OMS, et entre 4 et 6 mois en Europe par l'EFSA [123].

2.5. Besoins nutritionnels

Une alimentation adaptée est essentielle dès la naissance pour assurer la croissance, le développement cognitif, le bon fonctionnement du métabolisme et des organes, ainsi que pour couvrir les dépenses énergétiques. Les besoins varient en fonction de l'âge, du sexe, du poids et de l'activité physique [21].

Les Apports Nutritionnels Conseillés (ANC) sont définis en fonction des besoins moyens et de la variabilité interindividuelle [124].

2.5.1. Besoins énergétiques

Ils tiennent compte aux besoins liés à la dépense énergétique, à l'entretien des fonctions vitales et à la croissance. Au 1^{er} mois de vie, ils sont de l'ordre de 113 kcal/Kg/j et diminuent progressivement jusqu'à atteindre 80 kcal/Kg/j à l'âge de 1 an [21,125].

2.5.2. Apports nutritionnels recommandés

Les principaux besoins du nourrisson en nutriments sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9. Apports nutritionnels pour les nourrissons entre 0 et 12 mois [120].

| Composants | Unités | 0-6 mois | 7-12 mois |
|---------------------------------------------|------------------|----------|-----------|
| Eau | mL/kg | 150-125 | 100 |
| Protéines animales | g/j | 09-10 | 9,4-9,9 |
| | % énergie totale | 6,2 | 5,3-4,9 |
| Lipides | g/j | 28-40 | |
| Acide linoléique | % énergie totale | 02-05 | |
| Acide α-linoléique | % énergie totale | 0,4-1 | |
| Glucides | g/j | 60-95 | 95-130 |
| Énergie totale | mJ/j | 1,54-2,6 | 2,9-3,89 |
| | Kcal/j | 370-633 | 694-932 |
| Fe | mg/j | 6-10 | |
| Ca | mg/j | 400 | 500 |
| Mg | mg/j | 40 | 75 |
| Na* | - | - | |
| Fluor** | mg/j | 0,25 | |
| Zn | mg/j | 5 | |
| Vitamine C | mg/j | 50 | |
| Vitamine D | μ g/j | 20-25 | |
| Vitamine A*** | ER/j | 350 | |

* Les besoins varient en fonction du climat, de la saison, des habitudes de vie et des caractéristiques individuelles.

**Si la concentration de fluor dans l'eau de boisson est inférieure à 0,3 mg/L.

*** L'équivalent rétinol (ER) = 1 mg de rétinol = 3,33 UI de vitamine A.

Les éléments minéraux essentiels, tels que le fer, le cuivre, le zinc et d'autres oligoéléments, jouent un rôle fondamental dans le métabolisme et la croissance des nourrissons [126]. Ils sont indispensables comme cofacteurs enzymatiques et pour diverses fonctions physiologiques, notamment la synthèse de l'ADN, le métabolisme énergétique et la modulation du stress oxydatif.

Le lait maternel et les formules infantiles fournissent des quantités variables de ces minéraux, la biodisponibilité est souvent plus élevée dans le lait humain grâce à des transporteurs spécifiques [127]. Des déficits en fer ou en zinc sont fréquents chez les nourrissons et peuvent entraîner des troubles du développement cognitif et immunitaire, qui nécessitent une attention particulière aux apports nutritionnels recommandés [128].

La figure 10 illustre l'implication des micronutriments dans les grandes voies métaboliques.

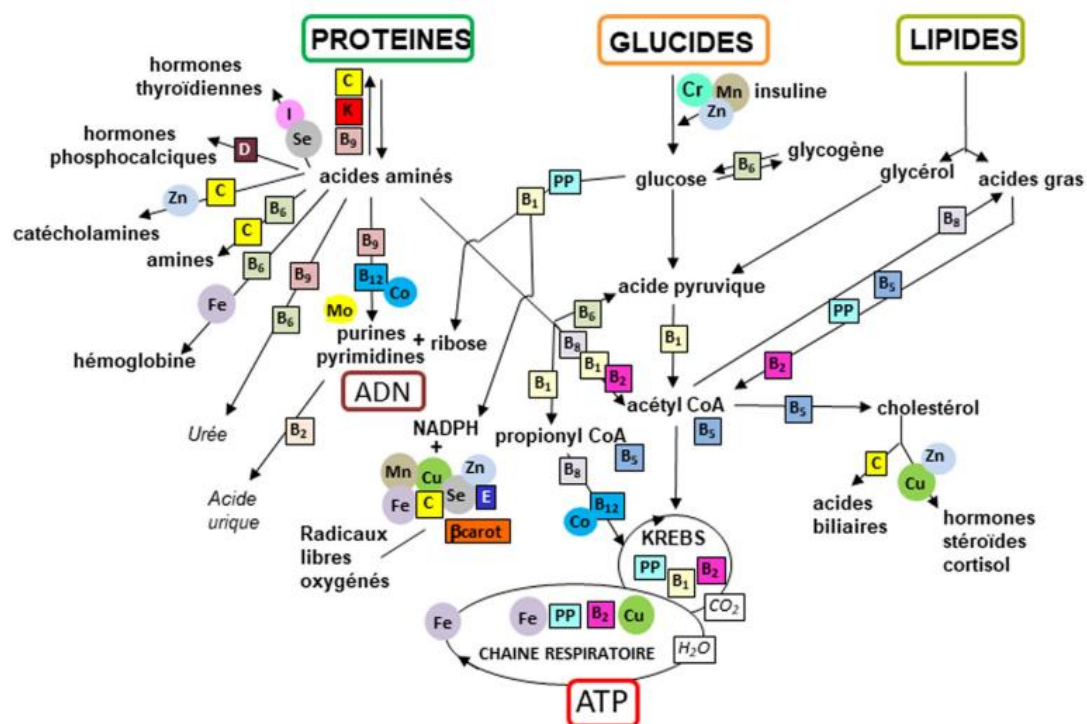


Figure 10. Implication des micronutriments dans les principales voies métaboliques [128].

Les vitamines sont représentées dans des carrés (A, B, C, D, E, K et PP). Les oligoéléments sont dans des cercles (Co : cobalt, Cr : chrome, Cu : cuivre, Fe : fer, I : iode, Mn : manganèse, Mo : molybdène, Se : sélénium, Zn : zinc). RLO : radicaux libres oxygénés

3. Les différents régimes d'alimentation infantile et leurs impacts sur la santé

3.1. Régimes d'allaitement infantile

En 2008, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a défini différents régimes d'allaitement infantile [21] :

3.1.1. Allaitement maternel exclusif

Le nourrisson ne reçoit que du lait maternel, sans aucun autre lait (y compris les préparations pour nourrissons) ni aliment, à l'exception d'une solution de réhydratation orale (SRO), de vitamines ou médicaments sous forme de gouttes ou sirops.

3.1.2. Allaitement maternel prédominant

Le nourrisson est principalement nourri au lait maternel, mais peut également recevoir de l'eau, des infusions ou des jus de fruits, ainsi que des SRO, gouttes et sirops, en l'absence de toute préparation pour nourrissons.

3.1.3. Allaitement partiel ou alimentation complémentaire

Les nourrissons sont nourris à la fois du lait maternel et d'autres aliments tels que les préparations pour nourrissons.

3.1.4. Alimentation au biberon

Inclut tout aliment, liquide ou semi-solide, consommé à l'aide d'un biberon et d'une tétine.

L'OMS recommande un allaitement maternel exclusif jusqu'à l'âge de six mois, sans apport d'eau ni d'autres aliments, afin d'assurer une croissance optimale et une protection immunitaire efficace. Malgré cela, les taux d'allaitement exclusif demeurent faibles :

- 40 % à l'échelle mondiale [129] ;
- 18 % en Europe [130] ;
- 55 % en Australie [131] ;
- 28,7 % en Algérie [132].

3.2. Bienfaits de l'allaitement maternel

L'allaitement maternel présente de multiples avantages, tant pour le nourrisson que pour la mère :

- **Chez l'enfant :**
 - Réduction des infections gastro-intestinales et respiratoires,
 - Diminution du risque de surpoids, de diabète, de malocclusions dentaires,
 - Meilleur développement cognitif et intelligence accrue.

- **Chez la mère :**

- Diminution du risque de cancer du sein et de l'ovaire,
- Réduction du risque de diabète de type 2 [133,134].

3.3. Facteurs influençant la décision d'allaitement artificiel

Lorsque l'allaitement maternel est impossible, insuffisant ou contre-indiqué, les formules infantiles constituent une alternative conforme aux recommandations de l'OMS [130]. Les raisons fréquemment évoquées par les parents pour recourir aux préparations infantiles sont les suivantes [135,136] :

- Perception d'un lait maternel insuffisant ;
- Besoin d'une meilleure satiété chez le nourrisson ;
- Retour au travail ou impératif professionnel ;
- Arrêt planifié de l'allaitement ;
- Pressions ou croyances familiales ;
- Volonté d'impliquer le second parent dans l'alimentation ;
- Recherche d'un équilibre des responsabilités parentales, facilité par l'usage du biberon.

3.4. Comparaison entre la composition du lait maternel et celle des PPN

Malgré les efforts pour imiter sa composition, les PPN restent des substituts imparfaits du lait maternel en raison de plusieurs éléments :

- Présence de protéines potentiellement allergènes ;
- Absence de facteurs de protection immunitaire (immunoglobulines, lactoferrine, lysozymes...) ;
- Absence de ligands facilitateurs de l'absorption de minéraux et vitamines ;
- Manque de facteurs de croissance et de composants bioactifs spécifiques [137].

Le Tableau 10 compare les principales caractéristiques nutritionnelles du lait maternel et des préparations pour nourrissons pour 1 L de produit. Les écarts notables concernent la quantité de protéines, les oligosaccharides, le ratio calcium/phosphore et certains micronutriments.

Tableau 10. Comparaison de la composition du lait maternel et des préparations pour nourrissons [137].

| Valeur pour 1 litre | Lait maternel | Lait pour nourrissons |
|-------------------------|---------------|-----------------------|
| Calories (Kcal) | 650-670 | 650-690 |
| Protéines (g) | 08-12 | 15-18 |
| Caséine (%) | 30-40 | 40-60 |
| Lipides (g) | 35 | 33-37 |
| AG saturés (%) | 50 | 50 |
| AG insaturés (%) | 50 | 50 |
| A linoléique (%) | 3,5-6 | 3,2-4,1 |
| Glucides (g) | 70 | 69-78 |
| Lactoses (%) | 85 | 90-100 |
| Oligosaccharides | 15 | 0 |
| Sodium (mg) | 160 | 160-240 |
| Calcium (mg) | 350 | 470-650 |
| Phosphore (mg) | 150 | 230-320 |
| Apport Ca/P | 2,2 | 1,3-2,2 |

4. Classification, usages et particularités des préparations infantiles

Le terme *formule infantile* désigne l'ensemble des produits lactés adaptés aux nourrissons, qu'ils soient à base de lait de vache, de protéines végétales (soja, riz) ou encore d'acides aminés libres [138].

Les préparations pour nourrissons sont disponibles sous trois formes principales :

- **Poudre** : la plus économique, à reconstituer avec de l'eau.
- **Concentré liquide** : à diluer dans un volume équivalent d'eau.
- **Prête à l'emploi** : la plus onéreuse, utilisable directement, souvent réservée aux nourrissons hospitalisés [4].

4.1. Formules standards à base de lait de vache pour nourrissons à terme

4.1.1. Préparation initiale pour nourrissons ou lait initial (1^{er} âge)

Englobe tout type de lait à base de lait de vache pouvant être donné au bébé dès la naissance et jusqu'au 6 premiers mois en remplacement ou en complément du lait maternel. Il est désigné sous le terme de 1^{er} âge. Ce lait pourra être donné au nourrisson jusqu'à l'âge de 12 mois [139].

4.1.2. Lait de suite (2^{ème} âge)

Lait destiné aux bébés à partir de six mois. Il diffère du lait initial par sa teneur élevée en caséines. Le lait de suite ne convient pas aux bébés de moins de six mois [139].

4.1.3. Formules de croissance (3^{ème} âge)

Destinées aux enfants âgés de 1 à 3 ans. Ces préparations sont enrichies en vitamines et en sels minéraux ainsi qu'en calcium (quantité légèrement supérieure à celle du lait entier).

La majorité des nourrissons passent des formules pour nourrissons au lait de vache pasteurisé entier vers l'âge de 12 mois. Dans la plupart des cas, il n'y a aucune nécessité pour que les nourrissons aient besoin de laits de stade 3 [140].

4.2. Formules pour nourrissons à terme en cas de signes et symptômes d'intolérance

4.2.1. Lait hypoallergénique « HA »

Il est destiné aux bébés qui portent un haut risque de prédisposition familiale d'allergie. Il existe sous forme de lait initial et de lait de suite. Dans ce lait, les protéines du lait de vache ont été modifiées de manière à minimiser les réactions allergiques. Si le bébé a déjà été diagnostiqué d'allergie aux protéines du lait de vache, ce type de lait ne convient pas [139].

4.2.2. Lait à base de protéines de Soja

C'est un produit diététique sans lactose, sans gluten et sans saccharose, destiné aux bébés présentant une intolérance au lait de vache (lactose ou protéines). Sa composition est soumise à des critères stricts définis par la réglementation [141]. Elles ne sont pas recommandées pour les prématurés [4].

4.2.3. Formules pour coliques et troubles digestifs

Ce sont des préparations à base de protéines partiellement hydrolysées (caséine ou lactosérum), additionnées dans certains cas de probiotiques ou d'amidon de riz et contenant une faible quantité de lactose. Leur rôle est surtout de soulager les symptômes d'intolérance comme les gaz et l'inconfort digestif [4,142].

4.2.4. Formules sans lactose

Elles contiennent des protéines de lait de vache. Les glucides sont remplacés par du sirop de riz ou de maïs. Ces formules sont indiquées pour les déficiences temporaires en lactase après une gastro-entérite aiguë ou en cas de malnutrition associée à la diarrhée [4].

4.2.5. Formules pour reflux gastro-œsophagien (RGO)

Préparations qui contiennent de l'amidon de riz pour augmenter la viscosité. Elles permettent la réduction de la régurgitation et des symptômes associés (toux, étouffement) [142].

4.3. Autres formules spécialisées

4.3.1. Formules pour prématurés

Conçues pour les nourrissons prématurés ou de faible poids (< 1500 g). Riches en protéines (intactes et partiellement hydrolysées) et en minéraux, surtout le calcium et le phosphore pour favoriser la croissance osseuse [4,143].

4.3.2. Formules à base d'acides aminés

Développées pour les nourrissons incapables de digérer ou tolérer les protéines de lait de vache intactes ou ceux qui présentent des troubles de malabsorption. Les protéines de caséine sont traitées thermiquement et hydrolysées enzymatiquement. Ces formules sont toutes sans lactose et adaptées à des situations cliniques complexes comme le syndrome de l'intestin court [144].

4.3.3. Formules réduites en minéraux

Ce sont des préparations qui contiennent de faibles teneurs en phosphore, potassium et fer ; similaires au lait maternel. Elles sont utilisées dans le cas de troubles calciques, insuffisance rénale, maladies comme le syndrome de Williams, l'hyperparathyroïdie néonatale, et l'ostéoporose [144].

5. Composition, fabrication et réglementation des préparations pour nourrissons

5.1. Ingrédients

La composition des formules infantiles repose sur des ingrédients soigneusement sélectionnés pour répondre aux besoins nutritionnels du nourrisson. Chaque ingrédient joue un rôle spécifique, en particulier dans le développement neurologique, immunitaire et métabolique (*cf.* Tableau 11) [145].

Tableau 11. Principaux ingrédients des préparations pour nourrissons [97].

| Ingrédient principal | Rôle / Fonction |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| DHA (acide docosahexaénoïque) | Développement cérébral et structure du tissu nerveux. |
| ARA (acide arachidonique) | Structure des membranes cellulaires et développement cognitif. |
| Nucléotides | Croissance rapide, immunité et récupération de la muqueuse intestinale. |
| Prébiotiques | Stimulation de l'activité des bactéries bénéfiques dans le microbiote intestinal. |
| Probiotiques | Modification de la microflore intestinale et renforcement de l'immunité. |
| Carnitine | Transport des acides gras pour la production d'énergie |
| Fer | Prévention de l'anémie et développement cognitif |
| Zinc | Croissance cellulaire et fonction immunitaire |
| Vitamines (A, D, E, K, B, C) | Croissance, développement du squelette, immunité et métabolisme général |
| Protéines | Croissance et développement des muscles |
| Glucides (lactose, autres sucres) | Source d'énergie principale pour le nourrisson |
| Lipides (huiles végétales) | Source d'énergie et développement cérébral |

5.2. Processus de fabrication

La fabrication des formules infantiles est encadrée par des normes internationales, en particulier celles du Codex Alimentarius, établi conjointement par la FAO et l’OMS [21].

Les fabricants doivent respecter des procédures rigoureuses garantissant la qualité nutritionnelle, la sécurité microbiologique et la traçabilité des produits.

Deux procédés industriels principaux sont utilisés :

5.2.1. Procédé de mélange sec

Il a l’avantage de réduire le risque de croissance microbiologique grâce à l’absence d’eau et permet un meilleur contrôle de la qualité via l’homogénéisation à haute pression et un traitement thermique avant le séchage [75,146].

5.2.2. Procédé de mélange humide

Il comprend trois étapes principales :

- Préparation du mélange émulsion huile-eau homogène ;
- Evaporation par concentration des solides et élimination des pathogènes ;
- Séchage par pulvérisation pour l’obtention d’une poudre de haute qualité.

Les deux procédés sont parfois combinés en ajoutant certains ingrédients secs (vitamines, oligo-éléments) après séchage, en veillant à leur qualité microbiologique [146].

La Figure 11 présente le schéma général d'une ligne de fabrication des préparations infantiles en poudre [147].

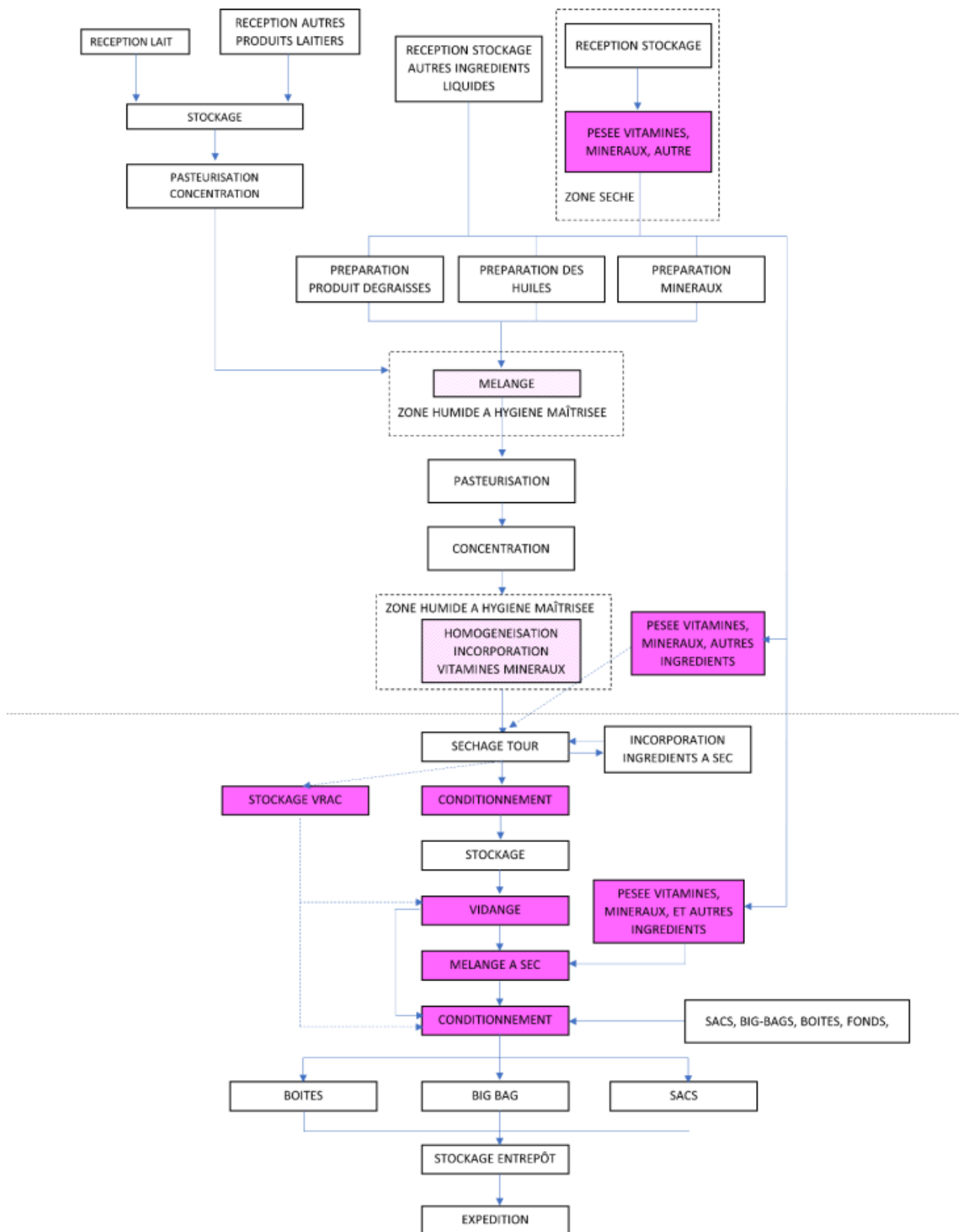


Figure 11. Ligne de fabrication des préparations infantiles en poudre [147].

Il existe des préparations liquides prêtes à l'emploi, bien que minoritaires à l'échelle mondiale, elles sont privilégiées pour leur praticité et leur stérilité. Elles sont principalement utilisées pour les nourrissons prématurés, de faible poids à la naissance, et pour des besoins en nutrition médicale. Ces formules sont stérilisées et conditionnées de manière aseptique pour garantir leur sécurité [120].

5.3. Conditionnement et réglementation

Les formules doivent être conditionnées dans des récipients hermétiques, permettant de préserver l'hygiène et la qualité du produit. Des gaz inertes (azote, CO₂) peuvent être ajoutés pour limiter l'oxydation [121,146,148]. Elles doivent respecter des règles strictes d'étiquetage définies par la législation algérienne et les directives du Codex Alimentarius.

5.3.1. Les exigences d'étiquetage

- La mention de la source protéique.
- L'indication « préparation lactée pour nourrissons » (si le lait de vache est la seule source de protéines).
- La liste des ingrédients par ordre décroissant de proportion,
- La valeur énergétique, exprimée en kcal/kJ pour 100 g/mL de produit sec ou reconstitué,
- Les conditions de conservation avant et après ouverture,
- Illustration claire pour montrer le mode d'emploi du produit.
- Des illustrations du mode d'emploi,
- Les instructions relatives à l'entreposage après ouverture du récipient,
- L'inscription : « Le lait maternel est l'aliment idéal pour votre bébé » [121,148].

5.3.2. Interdictions d'étiquetage

- Représentations idéalisées (images de nourrissons ou femmes),
- Termes comme « humanisé » ou « maternisé » [121,148].

6. Risques de contaminations microbiologique et chimique des PPN

6.1. Contaminants microbiologiques

6.1.1. Effets des microorganismes sur la santé du nourrisson

Les effets varient selon la nature des micro-organismes :

- **Effets bénéfiques**

Certains probiotiques, volontairement incorporés dans les formules, renforcent le système immunitaire et favorisent la santé intestinale du nourrisson [149].

- **Effets néfastes**

Des contaminations accidentelles par des agents pathogènes peuvent provoquer des infections graves (septicémies, méningites), parfois mortelles, notamment chez les nouveau-nés [150].

6.1.2. Sources de contamination des préparations pour nourrissons

A ce jour, aucune technologie ne permet de garantir la stérilité complète des laits en poudre. On distingue deux types de contamination :

- **Contamination intrinsèque**

Se produit au stade de la fabrication, à partir de l'environnement industriel ou des matières premières (ex. : lait en poudre, additifs) [21].

- **Contamination extrinsèque**

Survient lors de la manipulation ou reconstitution par le consommateur ou les professionnels de santé (ex. : mauvaise hygiène, stockage inadéquat) [21].

6.1.3. Principales bactéries incriminées

Certaines bactéries pathogènes peuvent contaminer les préparations pour nourrissons et représenter un risque pour leur santé. Parmi les principales bactéries incriminées, on retrouve :

- *Cronobacter sakazakii* (anciennement *Enterobacter sakazakii*, renommée en 2008).
- *Salmonella spp.*
- *Clostridium botulinium*.

Les deux premières sont les plus préoccupantes. Elles peuvent contaminer les produits après la pasteurisation et provoquer des épidémies nosocomiales, en particulier chez les prématurés ou les nourrissons de moins de 2 mois [139].

En 2004, des épidémies liées à *C. sakazakii* ont été signalées en France et en Nouvelle-Zélande, avec des cas mortels [151].

Depuis 1995, au moins six flambées de salmonelloses liées à des PPN ont été rapportées dans plusieurs pays : Canada, France, Corée, Espagne, Etats-Unis, Royaume-Uni [130]. Des cas de *Pseudomonas aeruginosa* ont été documentés dans des unités de néonatalogie [152].

6.1.4. Nourrissons à risque

Les nourrissons de moins de 12 mois représentent la population la plus vulnérable. Parmi eux, les nouveau-nés et les prématurés ou ceux présentant un faible poids à la naissance (moins de 2,5 kg) sont particulièrement à haut risque. Les nourrissons immunodéprimés constituent également un autre groupe particulièrement sensible. Il est à noter que les nourrissons nourris au sein ont deux fois moins de risques de contracter une salmonellose que ceux nourris au lait en poudre [150].

6.2. Contaminants chimiques

Les mères sont inévitablement exposées à des composés chimiques environnementaux au cours de leurs activités quotidiennes et par divers vecteurs tels que l'alimentation, l'eau, l'air ou les produits manufacturés [153]. Le lait de vache peut être contaminé de manière similaire au lait maternel [154]. Martin Carrasco et al., ont analysé les résultats d'articles scientifiques publiés au cours de la dernière décennie pour étudier les contaminants présents dans les laits maternels et artificiels. Les résultats ont montré la présence de contaminants dans les deux types de lait, bien que leurs concentrations dans les laits artificiels soient généralement plus élevées, notamment les métaux, tels que l'aluminium (Al), le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et l'arsenic (As) [155].

6.2.1. Sources de contamination du lait artificiel

- Les phénomènes naturels, tels que le volcanisme, l'érosion minérale ainsi que les activités anthropiques (pollution industrielle et déchets chimiques), jouent un rôle important dans le transport et la dispersion des éléments chimiques dans l'environnement, ce qui entraîne leur accumulation dans la chaîne alimentaire [156].
- Les métaux ne subissent pas de processus de biodégradation et, une fois libérés dans l'environnement, ils sont adsorbés par les sédiments et introduits dans la chaîne alimentaire [157].
- L'eau utilisée pour l'irrigation des cultures peut être une voie directe de contamination [157,158].
- Les matières premières utilisées dans la fabrication des aliments pour nourrissons peuvent contenir des métaux, en particulier les produits à base de riz, qui ont tendance à accumuler davantage de contaminants.

- Lors du traitement industriel, des sels inorganiques peuvent être ajoutés pour enrichir les aliments en minéraux essentiels comme le calcium, le fer ou le zinc et devenir ainsi, une source de contamination [159].

- La contamination peut également survenir lors de la reconstitution des préparations avec de l'eau potable qui peut être chimiquement contaminée ; par la suite, servies avec un biberon et une tétine, susceptibles d'ajouter des contaminants chimiques par migration depuis leurs matériaux [160].

6.2.2. Principaux contaminants chimiques du lait

- **Contaminants environnementaux**

- Métaux lourds : aluminium (Al), plomb (Pb), cadmium (Cd), mercure (Hg), arsenic (As) ;
- Pesticides agricoles.
- Mycotoxines (aflatoxines, ochratoxines).
- Dioxines et polychlorobiphényles (PCB).

- **Résidus vétérinaires**

- Médicaments vétérinaires, notamment antibiotiques.
- Excès de vitamines liposolubles (A, D, E) [161–163].

Le tableau 12 présente les concentrations de plusieurs contaminants chimiques dans le lait maternel et les laits artificiels de 1^{er} âge, exprimées en ng/g.

Tableau 12. Teneurs en contaminants chimiques dans le lait maternel et les laits infantiles de 1^{er} âge [164].

| Substance | Lait maternel | | | | Lait artificiel de 1 ^{er} âge | | | Unité |
|------------------|-----------------|------------|---------|----|----------------------------------------|---------|-------|-------|
| | %Quantification | Moyenne UB | Moyenne | SD | n (3) | Moyenne | SD | |
| Aluminium | 5,60 | 61,20 | 33,30 | - | 9 | 180,70 | 90 | ng/g |
| Antimoine | 0 | 0,60 | 0 | - | 13 | < 0,50 | - | ng/g |
| Arsenic | 7,80 | 1,98 | 0,74 | - | 2 | 3 | 4 | ng/g |
| Cadmium | 0 | 0,30 | 0 | - | - | < 0,30 | - | ng/g |
| Chrome VI (100%) | 0,53 | 6,31 | 1,34 | - | 12 | 21 | 9,37 | ng/g |
| Manganèse | 3,30 | 0,64 | 1,29 | - | 13 | 123 | 89,81 | ng/g |
| Mercure | 89 | 0,14 | 0,07 | - | 13 | < 0,50 | - | ng/g |
| Méthyl-mercure | 29,50 | 0,14 | 0,07 | - | - | < 25 | - | ng/g |
| Nickel | 0 | 30,20 | 2,24 | - | 13 | < 25 | - | ng/g |
| Plomb | 11,70 | 1,21 | 1,30 | - | 12 | 0,93 | 0,51 | ng/g |

SD : Ecart-type (Standard Deviation). *n* : Nombre d'échantillons analysés. *UB* : Moyenne avec substitution des valeurs inférieures à la limite de quantification par la limite supérieure.

7. Recommandations et pratiques pour la préparation et la conservation des PPN

A la suite des épidémies de *Cronobacter sakazakii* et *Salmonella enterica* signalées en 2001 et 2011, l'OMS et la FAO ont émis des directives précises visant à minimiser les risques microbiologiques lors de la préparation des laits infantiles. Ces recommandations ont été reprises et adaptées par des institutions telles que la FDA, les CDC et l'Académie Américaine de Pédiatrie (AAP) [3,165].

7.1. Utilisation de l'eau

Pour la préparation des biberons, il est recommandé d'utiliser uniquement de l'eau froide du robinet, en la laissant couler quelques secondes avant usage. Eviter l'eau minérale en bouteille, qui contient souvent trop de sels minéraux. Si elle est utilisée, traiter l'eau en bouteille, non stérile, comme l'eau du robinet [130,139,146].

7.2. Qualité de l'eau pour la préparation des laits infantiles

Les formules infantiles étant souvent plus riches en minéraux que le lait maternel, il est essentiel d'utiliser une eau faiblement minéralisée, afin d'éviter une surcharge rénale osmotique, surtout durant les premiers mois où le débit de filtration glomérulaire est encore très faible (de l'ordre de 20 mL/min/1,73 m²) et n'atteint la maturité qu'à l'âge d'un an (100 mL/min/1,73 m²) [166] [167].

7.3. Procédure de préparation

Les bonnes pratiques recommandées sont les suivantes [120,130,139,146,168] :

- Faire bouillir l'eau pendant 1 minute, puis laisser refroidir à 70 °C.
- Verser l'eau chaude dans le biberon.
- Ajouter la quantité exacte de poudre (respecter les mesures).
- Mélanger vigoureusement, vérifier l'absence de grumeaux.
- Refroidir à 37 °C avant administration.

Une dilution incorrecte peut entraîner soit une déshydratation (trop peu d'eau), soit une carence nutritionnelle (trop d'eau). Le Tableau 13 résume les principales recommandations pour une préparation correcte et sécurisée des formules pour nourrissons.

Tableau 13. Résumé des recommandations pour la préparation des formules pour nourrissons [3,130].

| Agence ou Organisation | Recommandations |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| OMS | Faire bouillir l'eau, laisser refroidir à 70 °C, ajouter la poudre, refroidir immédiatement. |
| CDC | Même procédure, recommandée surtout pour les nourrissons de moins de 3 mois, prématurés, ou immunodéprimés. |
| FDA | Faire bouillir pendant 1 min, ou suivre les instructions du fabricant. |
| AAP | Faire bouillir si doute sur l'eau du robinet, refroidir à 75 °F max avant ajout de la poudre. |
| Etiquettes produits | Recommandation similaire à celle de la FDA. |

AAP : Académie Américaine de Pédiatrie ; *CDC* : Centres pour le Contrôle et la Prévention des Maladies ; *FDA* : Administration des Aliments et des Médicaments ; *OMS* : Organisation Mondiale de la Santé.

7.4. Conservation des biberons préparés

La durée et les conditions de conservation des biberons préparés varient selon la méthode de stockage :

- A température ambiante : ≤ 2 heures.
- Dans un sac isotherme : ≤ 4 heures.
- Au réfrigérateur (non dans la porte) : ≤ 24 heures.
- Ne pas congeler les préparations.
- Réchauffage : au bain-marie, jamais aux micro-ondes, (risque de brûlures dues aux "points chauds" qui pourraient provoquer des brûlures au bébé) [130,139].

7.5. Stérilisation des biberons et des tétines

- Stérilisation obligatoire avant-première utilisation.
- Nettoyage ultérieur : au lave-vaisselle ou à la main avec eau savonneuse.
- Désinfection régulière des ustensiles de préparation [139,146].

Le tableau suivant présente les volumes et fréquences d'alimentation généralement conseillés en fonction de l'âge.

Tableau 14. Recommandations d'alimentation au biberon en fonction de l'âge du nourrisson [137,169,170].

| Age | Poids moyen de l'enfant (kg) | Eau (ml) | Nombre de mesurette | Nombre de biberons par jour |
|--------------------------------------------------|------------------------------|------------|---------------------|-----------------------------|
| De la naissance à 1^{ère} semaine | 3,5 | 30 puis 60 | 2 | 7 puis 6 |
| 2^{ème} à 4^{ème} semaine | 3,9 | 90 | 3 | 6 |
| 1 à 2 mois | 4,7 | 120-150 | 4 | 6 |
| 2 à 3 mois | 5,6 | 150 | 5 | 6-5 |
| 3 à 4 mois | - | 180 | 5 | 5 |
| 5 mois | 6,1 | 210 | 7 | 4 |
| De 6 mois à 12 mois | - | 210 | 7 | 4 |

La reconstitution d'un biberon se fait toujours comme suit : 1 mesurette de poudre pour 30 ml d'eau ce qui donne un volume total de 33 ml [137].

8. Etat des lieux et initiatives locales de la production de lait infantile en Algérie

La production mondiale de lait en poudre pour nourrissons est estimée à plus de 2 millions de tonnes de lait en poudre par an. La consommation nationale est entièrement couverte par l'importation de poudres de lait infantile en provenance d'Europe. Afin de réduire cette dépendance, plusieurs initiatives ont été lancées pour favoriser le développement d'une production locale [171].

En août 2022, le ministère de l'industrie a annoncé, dans un communiqué, le lancement du projet de production de préparations pour nourrissons (poudre de lait infantile), après avoir initié deux phases de consultation d'intégration et de partenariat. Cependant, ce projet n'a pas abouti [172].

En août 2024, un nouveau projet de production de lait et de farine infantiles a été présenté à dans le cadre d'une coopération entre un opérateur privé national et le Groupe Saidal. Cette usine, située à El Harrach, prévoit une production de 15 000 tonnes de lait en poudre et 10 000 tonnes de farine, avec un démarrage prévu au 2^{ème} trimestre 2025. Une deuxième phase prévoit la création d'une ferme de 3 600 vaches laitières à Djelfa pour la production directe de poudre de lait [171].

En septembre 2024, un mémorandum d'entente a été signé entre le ministère de l'industrie et de la production pharmaceutique et la société Qatarie Baladna pour la création d'une usine intégrée de production de lait infantile à Adrar, dans le cadre d'un partenariat Algéro-Quatari [173].

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE I

Enquête sur l'allaitement infantile dans la Wilaya d'Annaba

1. Matériel et méthodes

L'objectif de cette enquête est d'évaluer les habitudes d'alimentation infantile chez les nourrissons âgés de moins de 12 mois dans la wilaya d'Annaba, dans le but de :

- Identifier les facteurs qui motivent le recours à l'allaitement artificiel,
- Analyser les modalités de préparation des biberons, notamment le choix du lait infantile, le type d'eau utilisée pour la reconstitution, et les pratiques de chauffage,
- Et apprécier, à travers ces éléments, l'exposition potentielle des nourrissons à l'aluminium, dans le cadre de ce même travail visant à quantifier les teneurs en aluminium dans les préparations infantiles et dans l'eau de reconstitution, et à les comparer à celles du lait maternel.

1.1. Cadre de l'étude

1.1.1. Localisation de la zone d'étude

Cette étude a été réalisée dans la wilaya d'Annaba, située dans le Nord-Est de l'Algérie, sur la façade méditerranéenne. Elle est délimitée au nord par la mer Méditerranée, à l'est par la wilaya d'El Taref, à l'ouest par la wilaya de Guelma, et au sud par la wilaya de Souk-Ahras.

La wilaya comprend 12 communes, réparties en trois Etablissements Publics de Santé de Proximité (EPSP) :

- EPSP Annaba,
- EPSP El Hadjar,
- EPSP Berrahal.

Elle abrite 793 172 habitants, selon les données du site officiel ministère de l'intérieur (2019) [174].

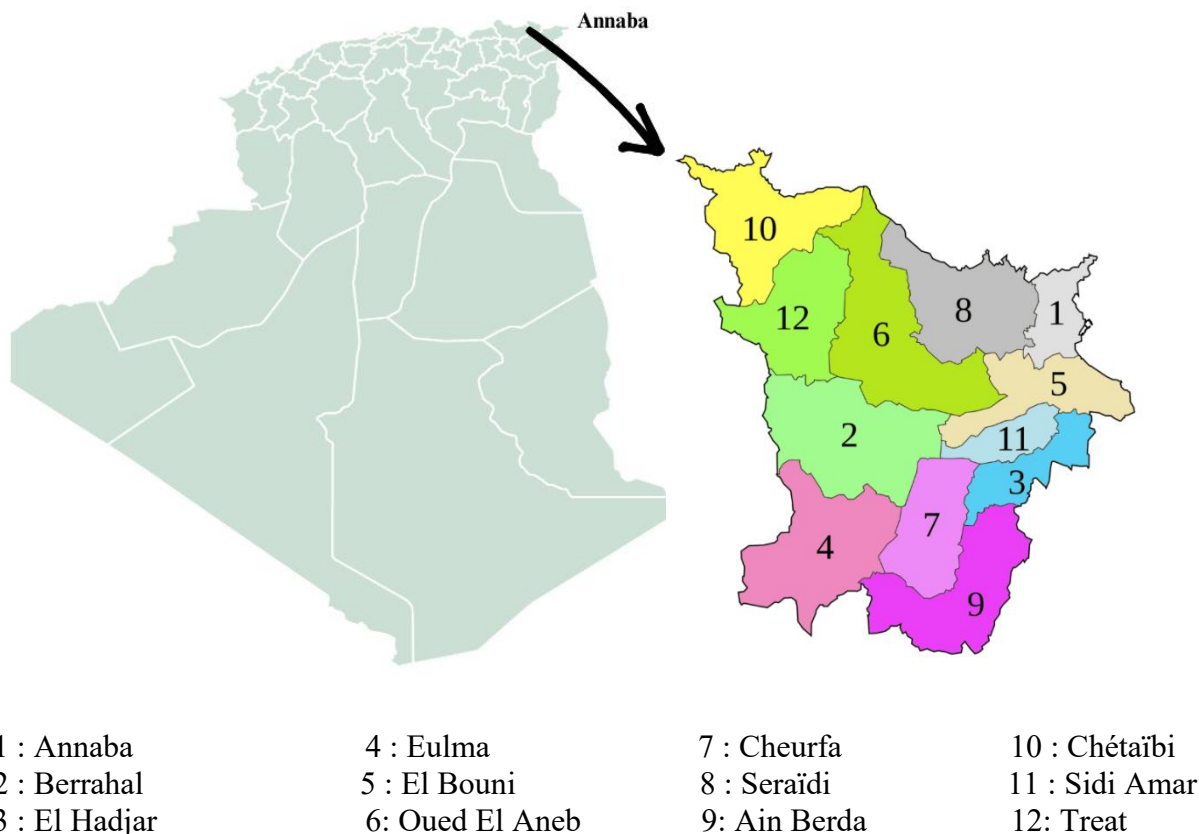


Figure 12. Localisation géographique de la wilaya d'Annaba en Algérie et répartition de ses 12 communes [175,176].

1.1.2. Type d'étude

Il s'agit d'une étude descriptive transversale, menée auprès de 874 mères de nourrissons âgés entre 0 et 12 mois, dans le but d'évaluer les pratiques d'allaitement dans la wilaya d'Annaba.

1.1.3. Période d'enquête

L'enquête s'est déroulée sur une période de quatre mois, du 1^{er} juin au 30 septembre 2024.

1.1.4. Population cible

La population ciblée comprend les mères ayant un enfant âgé de 0 à 12 mois, résidant dans la wilaya d'Annaba. Ces participantes ont été interrogées dans les centres de Protection Maternelle et Infantile (PMI) relevant des trois EPSP de la wilaya.

1.1.5. Taille de la population

La taille minimale de l'échantillon a été calculée à l'aide de la formule suivante [177] :

$$N = \frac{Z^2 \times P \times Q}{I^2}$$

Où :

N est l'effectif des femme allaitantes.

Z est la valeur de la statistique associée au niveau de confiance (niveau de confiance de 95%, $Z = 1,96$).

P est la fréquence de l'allaitement maternel à 6 mois = 28,7% = 0,287 [132,178],

Q est la complémentaire de P, soit, $Q = 1 - P =$ fréquence des femmes non allaitantes, $Q = 1 - 0,287 = 0,713$.

I est la précision, 3% soit, $I = 0,03$.

$$N = (1,96)^2 \times 0,287 \times 0,713 \div (0,03)^2 = 874 \text{ femmes.}$$

1.1.6. Sélection des participantes

Afin d'assurer une représentativité équilibrée des différentes zones géographiques de la wilaya d'Annaba, un total de 874 mères a été réparti entre les trois Etablissements Publics de Santé de Proximité (EPSP) de manière proportionnelle à la population totale desservie par chacun (Tableau 15).

La méthodologie suivie pour cette répartition s'est déroulée en plusieurs étapes :

- Calcul du pourcentage de la population totale relevant de chaque EPSP (Figure 13) ;
- Répartition des 874 participantes selon les pourcentages obtenus ;
- Distribution intra-EPSP : répartition des participantes dans les communes relevant de chaque EPSP, en fonction de la population de chaque commune (Figure 14) ;
- Distribution intra-commune : répartition des mères dans les différents centres de Protection Maternelle et Infantile (PMI) présents dans chaque commune.

Le nombre de mères interrogées (entre 10 et 30 par centre) a été déterminé en concertation avec le Service d'Epidémiologie et de Médecine Préventive (SEMEP) de chaque EPSP. Cette répartition a pris en compte la taille et l'affluence des centres de PMI.

Dans les centres à faible affluence, toutes les mères présentes ont été incluses, tandis que dans les centres à forte affluence, un échantillonnage systématique a été adopté. Le pas de sondage a été calculé en divisant le nombre total de femmes présentes par le nombre de participantes requises.

Par exemple, au centre de PMI de Séraïdi, 20 femmes étant présentes et 14 devant être interrogées, le pas de sondage calculé était d'environ 2, nous avons ainsi sélectionné une femme sur deux.

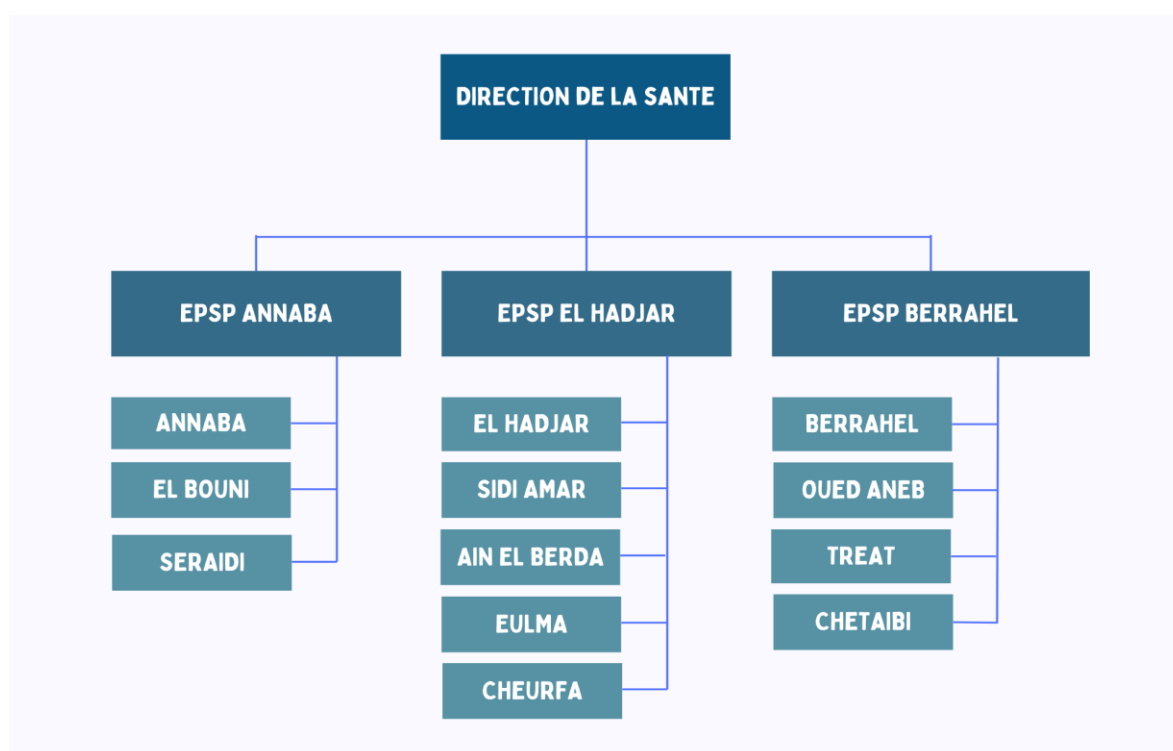


Figure 13. Organisation territoriale des communes de la wilaya d'Annaba selon leur rattachement aux EPSP.

Tableau 15. Population résidente des ménages ordinaires et collectifs (MOC) selon la commune de résidence en fin 2019 [174].

| Communes | Population à fin 2019 | Superficie Km ² | Densité Habitant/Km ² | %Population Commune/Pop.Wilaya |
|--------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Annaba | 263 650 | 50,00 | 5 273 | 33,28 |
| Seraïdi | 11 971 | 110,00 | 109 | 1,51 |
| El Bouni | 201 866 | 95,18 | 2 121 | 25,45 |
| El Hadjar | 46 305 | 64,74 | 715 | 5,84 |
| Sidi Amar | 110 955 | 44,90 | 2 471 | 13,98 |
| Berrahal | 47 768 | 174,14 | 274 | 6,02 |
| Oued El Aneb | 41 217 | 191,53 | 215 | 5,19 |
| Treat | 7 878 | 124,05 | 64 | 0,99 |
| Aïn El Berda | 25 590 | 139,60 | 183 | 3,22 |
| Cheurfa | 12 499 | 97,19 | 129 | 1,57 |
| Eulma | 13 244 | 165,35 | 80 | 1,67 |
| Chetaïbi | 10 229 | 136,52 | 75 | 1,28 |
| Total | 793 172 | 1 393,20 | 569 | 100 |

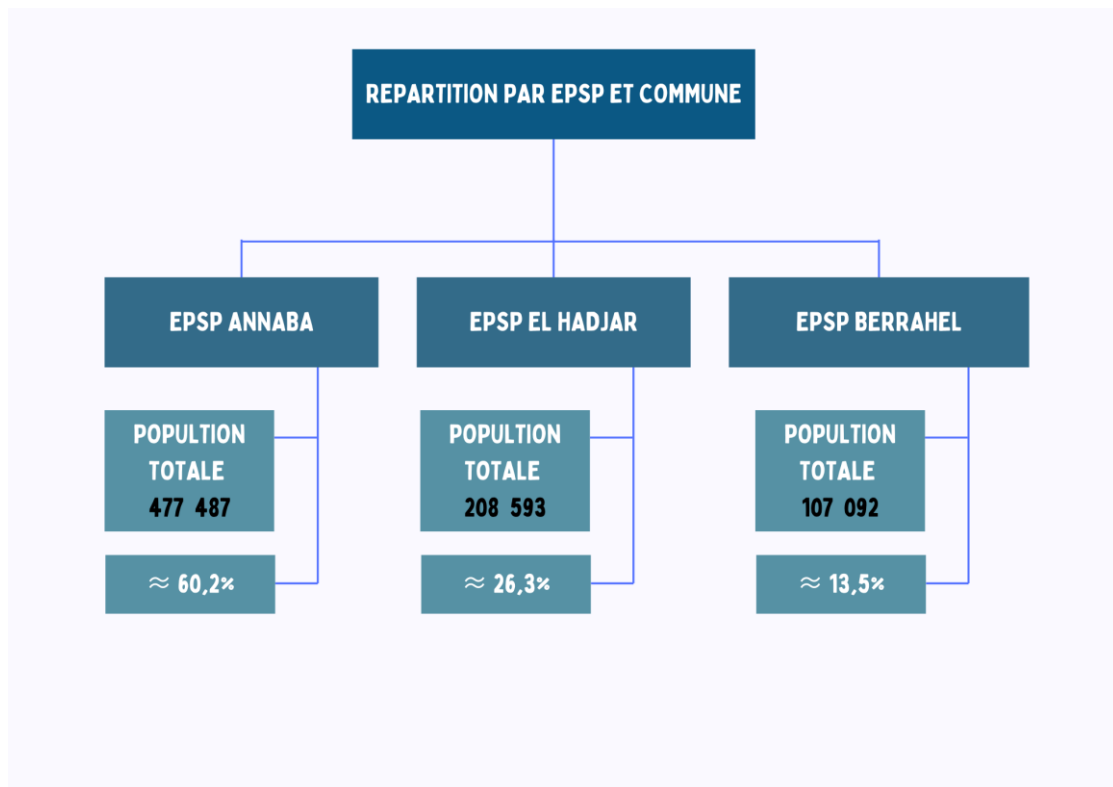


Figure 14. Répartition et pourcentage de la population totale attribuée à chaque EPSP.

1.2. Méthodologie d'enquête

1.2.1. Elaboration du questionnaire

Un questionnaire standardisé a été élaboré spécifiquement pour cette enquête. Il comporte un ensemble de questions fermées et semi-ouvertes, formulées en arabe dialectal pour faciliter la compréhension par l'ensemble des participantes, quel que soit leur niveau d'instruction.

Le questionnaire a été conçu en collaboration avec le service d'épidémiologie du CHU Annaba, puis validé par des professionnels de santé (médecins et sage-femmes) et le service de prévention de la direction de la santé de la wilaya d'Annaba afin de garantir la pertinence des items, leur clarté linguistique et leur adéquation culturelle.

Une phase de pré-test a été réalisée auprès de 20 mères afin de vérifier la lisibilité et la cohérence du contenu, avant son administration finale.

1.2.2. Contenu du questionnaire

Le questionnaire comprend quatre rubriques principales :

- **Données sociodémographiques** : âge, niveau d'instruction, profession, statut matrimonial, nombre d'enfants...etc.
- **Informations relatives à l'accouchement** : type d'accouchement, suivi prénatal, lieu d'accouchement, état de santé du nouveau-né...etc.
- **Pratiques d'alimentation du nourrisson** : type de l'allaitement, nombre de biberons par jour, diversification alimentaire...etc.
- **Choix du lait infantile** : type de lait utilisé, fréquence de consommation, marque, type de l'eau utilisée pour la reconstitution...etc.

Le questionnaire détaillé est joint en annexe (Annexe 01).

1.2.3. Administration du questionnaire

Les questionnaires ont été administrés en face-à-face, dans les centres de Protection Maternelle et Infantile (PMI) relevant des trois EPSP. Les entretiens ont été menés dans un cadre confidentiel, garantissant l'anonymat et la libre participation des mères interrogées.

1.2.4. Critères d'inclusion et d'exclusion

- **Critères d'inclusion** :
 - Mères ayant au moins un enfant âgé de 0 à 12 mois ;
 - Résidant dans la wilaya d'Annaba ;
 - Ayant donné leur consentement éclairé à participer.
- **Critères d'exclusion** :
 - Refus de participation ;
 - Difficulté de compréhension malgré la traduction ;
 - Données incomplètes.

1.3. Traitement statistique

1.3.1. Outils statistiques

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel SPSS 27 et du programme Excel 2021. Les variables qualitatives ont été exprimées en fréquences et pourcentages, tandis que les variables quantitatives l'ont été sous forme de moyenne \pm écart-type.

1.3.2. Modélisation statistique

Un modèle de régression logistique multinomiale a été choisi pour analyser les facteurs influençant le choix de l'allaitement. Ce modèle est adapté car la variable dépendante (*type d'allaitement : maternel exclusif, mixte, ou artificiel exclusif*) est catégorielle et comprend plus de deux modalités. La régression logistique multinomiale permet :

- D'estimer l'impact des variables explicatives sur la probabilité d'opter pour un type d'allaitement.
- D'analyser les interactions entre plusieurs facteurs simultanément.
- D'exprimer les résultats sous forme de cotes ($\exp^{(B)}$), qui facilitent l'interprétation des effets des variables indépendantes.

1.3.2.1. Variables explicatives incluses

Plusieurs facteurs ont été inclus comme variables explicatives :

- **Démographiques** : Age de la mère, parité, nombre d'enfants, âge gestationnel du dernier accouchement.
- **Socio-économiques** : Niveau d'études, situation professionnelle de la mère (femme active ou non), nombre d'heures de travail par semaine et lieu d'habitat (rural, semi-urbain et urbain).
- **Cliniques** : Mode du dernier accouchement (voie basse ou césarienne), situation pondérale du nourrisson à la naissance, notion de souffrance fœtale, état de santé du bébé.

Les variables ont été sélectionnées en fonction de leur pertinence théorique, des résultats issus de la littérature sur les déterminants du choix d'allaitement ainsi que de nos observations lors des entretiens réalisés avec les répondantes pendant l'enquête.

1.3.2.2. Ajustement et qualité du modèle

L'ajustement du modèle a été évalué par le log de vraisemblance. La significativité globale du modèle a été testée à l'aide du test du rapport de vraisemblance (Khi^2). Des pseudo-coefficients de détermination (Nagelkerke, Cox et Snell, McFadden) ont été calculés pour estimer la proportion de variance expliquée par le modèle.

1.3.2.3. Tests de significativité des variables explicatives

Les effets des différentes variables indépendantes ont été testés à l'aide de :

- **Test du Wald** utilisé pour évaluer la significativité individuelle de chaque coefficient du modèle.
- **Test du rapport de vraisemblance (Khi -carré)** pour comparer le modèle final avec un modèle réduit et déterminer la pertinence des facteurs inclus.
- **Odds Ratios (OR) et intervalles de confiance à 95 % (IC95 %)**, qui permettent d'interpréter l'influence relative des facteurs prédictifs sur le choix de l'allaitement.

Si $p < 0,05$: statistiquement significatif.

Si $p < 0,01$: hautement significatif.

2. Résultats

2.1. Caractéristiques générales de la population enquêtée

Cette étude a porté sur un échantillon de 874 mères, interrogées dans les centres de PMI relevant des trois EPSP de la wilaya d'Annaba.

2.1.1. Répartition par EPSP

La répartition des participantes entre les trois EPSP a été réalisée de manière proportionnelle à la population couverte par chacun :

- **EPSP Annaba** : 526 mères (60,2 %).
- **EPSP El Hadjar** : 230 mères (26,3 %).
- **EPSP Berrahal** : 118 mères (13,5 %) (Figure 15).

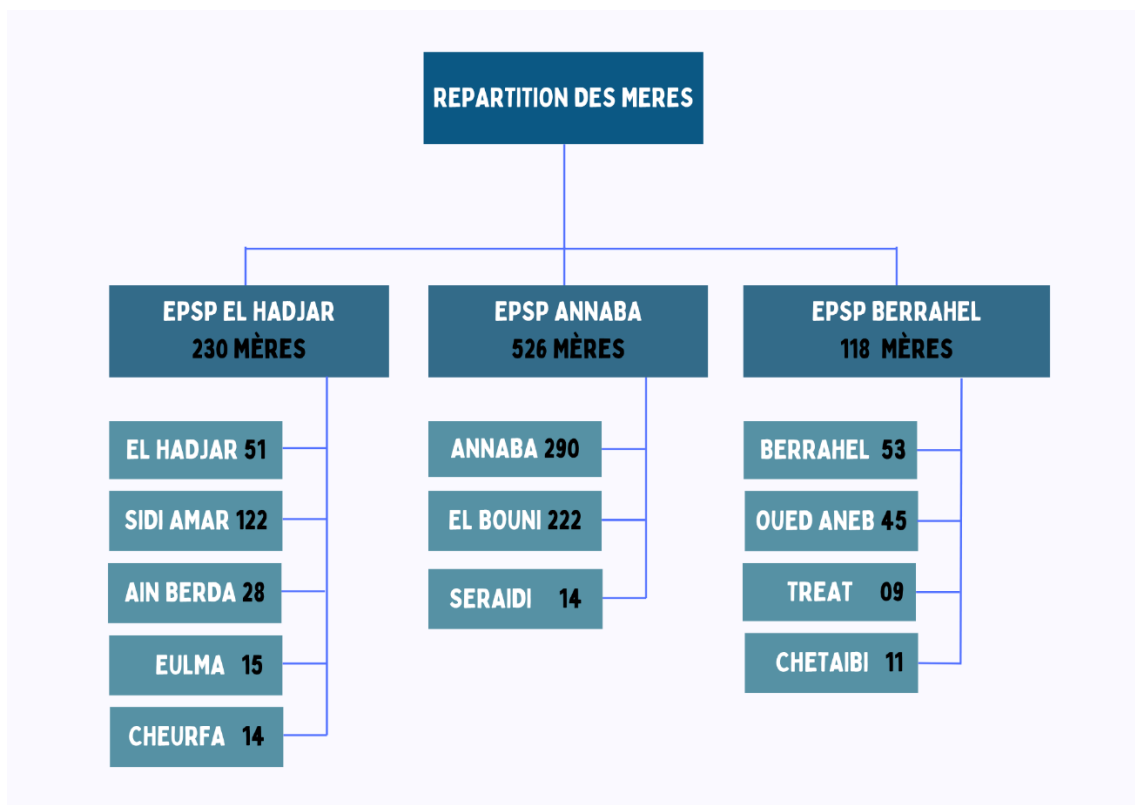


Figure 15. Répartition des mères enquêtées selon les EPSP.

2.1.2. Répartition selon la commune

Les 12 communes de la wilaya d'Annaba ont été représentées dans l'échantillon, en fonction de leur poids démographique au sein de chaque EPSP. La majorité des mères résident en zones urbaines (62,59 %), tandis qu'une part importante vit en milieu semi-urbain (31,12 %). Les mères qui vivent en milieu rural représentent une minorité (6,29 %) (Figure 16).

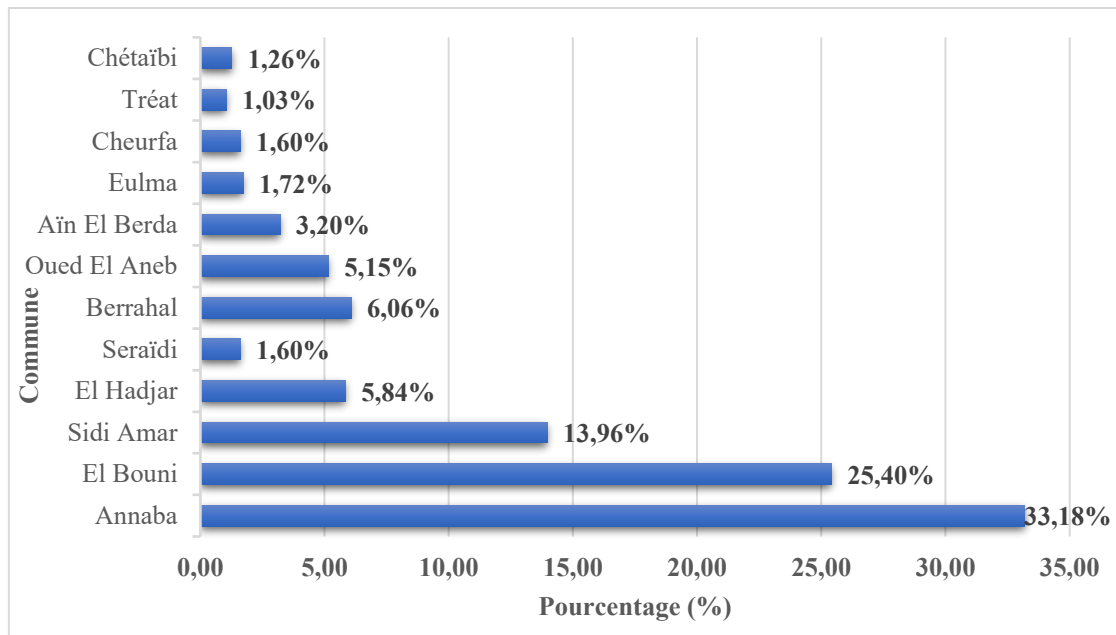


Figure 16. Répartition des mères enquêtées par commune.

La majorité des mères interrogées résident à Annaba (33,18 %), suivies par celles d'El Bouni (25,4 %) et de Sidi Amar (13,96 %). Les autres communes, comme Berrahal (6,06 %) et El Hadjar (5,84 %), sont représentées de manière plus modérée. Les communes de Aïn El Berda, El Eulma, et Chétaïbi, présentent des proportions inférieures à 5 %.

2.1.3. Répartition selon l'âge des mères

L'âge des mères varie entre 18 et 49 ans, avec une moyenne de $32,85 \pm 5,57$ ans.

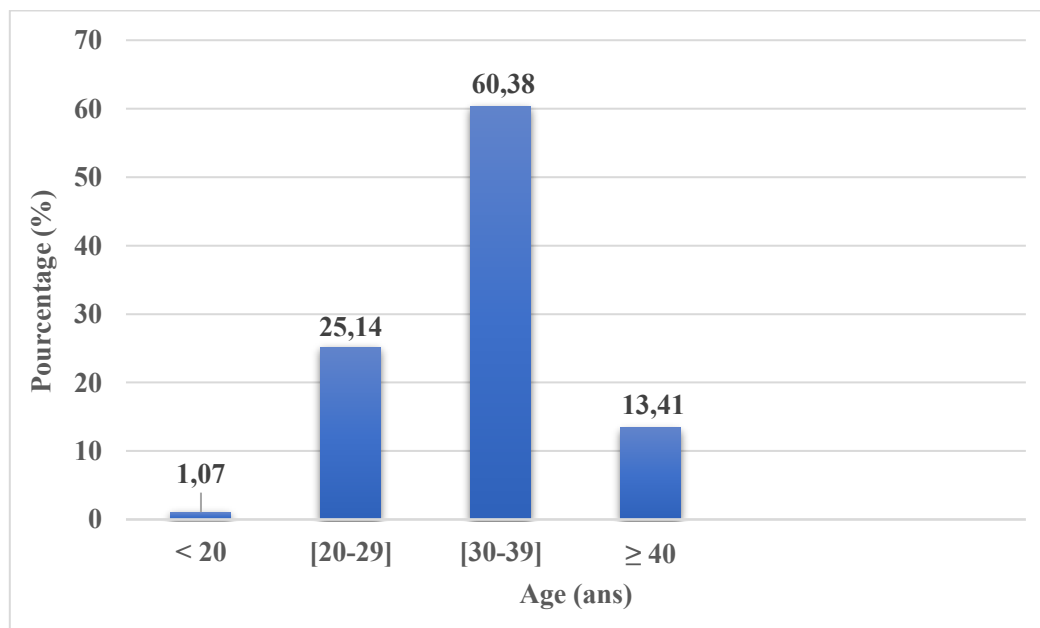


Figure 17. Répartition des mères selon les catégories d'âge.

La répartition des mères selon leur âge révèle que la tranche la plus représentée est celle des 30 à 39 ans, avec 60,38 %. Par contre, les tranches d'âge les moins représentées sont celles des mères de moins de 20 ans, qui représentent seulement 1,07 %, et celles de plus de 40 ans, avec 13,41 %.

2.1.4. Répartition selon le profil sociodémographique et professionnel des mères

Tableau 16. Caractéristiques sociodémographiques et professionnelles.

| Etat matrimonial | | |
|-----------------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Célibataire | 1 | 0,10 |
| Mariée | 866 | 99,08 |
| Veuve | 3 | 0,32 |
| Divorcée | 4 | 0,50 |
| Total | 874 | 100,00 |
| Niveau d'études | | |
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Universitaire | 417 | 47,68 |
| Secondaire | 236 | 27,02 |
| Moyen | 173 | 19,83 |
| Primaire | 37 | 04,17 |
| Analphabète | 11 | 01,30 |
| Total | 874 | 100,00 |
| Profession | | |
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Mère au foyer | 615 | 70,42 |
| Fonctionnaire | 193 | 22,08 |
| Employée | 42 | 04,77 |
| Fonction libérale | 18 | 02,13 |
| Etudiante | 6 | 0,60 |
| Total | 874 | 100,00 |
| Nombre d'heures de travail par semaine | | |
| Sous-catégorie (Heure) | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| < 10 | 19 | 07,31 |
| [10-20] | 43 | 16,69 |
| [21-30] | 40 | 15,54 |
| [31-40] | 137 | 53,05 |
| > 40 | 20 | 07,41 |
| Total | 259 | 100,00 |

Le tableau 16 présente une synthèse de quelques caractéristiques sociodémographiques et professionnelles de la population étudiée.

La quasi-totalité des femmes sont mariées (99,08 %). En ce qui concerne le niveau d'instruction, celui-ci est relativement élevé : 47,68 % des femmes ont un niveau universitaire, près d'un tiers (27,02 %) un niveau secondaire, et 19,83 % un niveau moyen. Les niveaux primaire (4,17 %) et analphabète (1,3 %) sont minoritaires.

Sur le plan professionnel, 70,42 % des femmes interrogées sont mères au foyer. Les fonctionnaires représentent 22,08 %, suivies des employées (4,77 %), des femmes exerçant une profession libérale (2,13 %) et des étudiantes (0,6 %). Parmi les femmes actives, plus de la moitié (53,05 %) travaillent entre 31 et 40 heures par semaine, tandis que les autres se répartissent entre des charges horaires inférieures à 30 heures ou supérieures à 40 heures.

2.1.5. Statut tabagique

La quasi-totalité des femmes interrogées ne fument pas. Seules deux (02) mères allaitantes, soit moins de 1 % de l'échantillon, ont déclaré être fumeuses.

2.1.6. Parité et nombre d'enfants

Tableau 17. Répartition selon la parité et le nombre d'enfants.

| Parité | | |
|-------------------------|---------------------|------------------------|
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Primipare | 281 | 32,15 |
| Multipare | 593 | 67,85 |
| Total | 874 | 100,00 |
| Nombre d'enfants | | |
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| [1-3] | 755 | 86,38 |
| [4-6] | 114 | 12,59 |
| > 6 | 5,00 | 01,03 |
| Total | 874 | 100,00 |

Les résultats présentés dans le tableau 17 montrent que 67,85 % des femmes interrogées sont multipares, tandis que 32,15 % sont primipares.

La majorité des participantes (86,38 %) ont entre 1 et 3 enfants. Seules 1,03 % des mères ont plus de 6 enfants.

2.1.7. Type d'allaitement de la fratrie

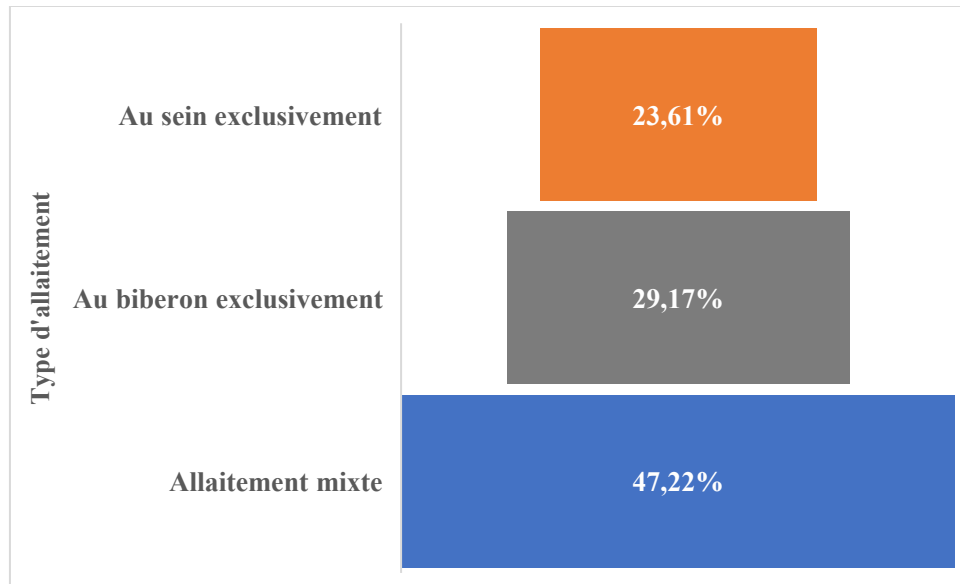


Figure 18. Répartition selon le type d'allaitement de la fratrie.

Concernant l'allaitement de la fratrie, 47,22 % des enfants ont été allaités à la fois au sein et au biberon, 29,17 % exclusivement au biberon, et 23,61 % exclusivement au sein (Figure 18).

2.1.8. Age gestationnel et mode d'accouchement

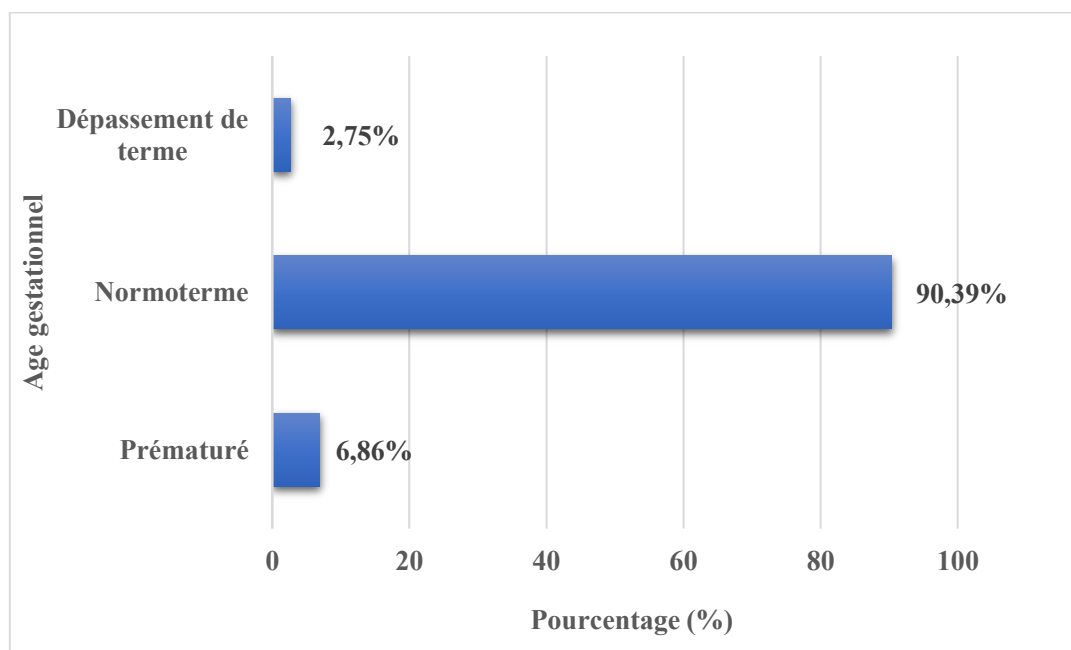


Figure 19. Répartition selon l'âge gestationnel du dernier accouchement.

Selon la figure 19, la majorité des naissances (90,39 %) se sont produites à terme (normotermes). Les cas de prématurité représentent 6,89 %, tandis que les dépassements de terme ne sont représentés que par 2,75 %.

2.2. Caractéristiques des nourrissons

2.2.1. Sexe et âge des nourrissons

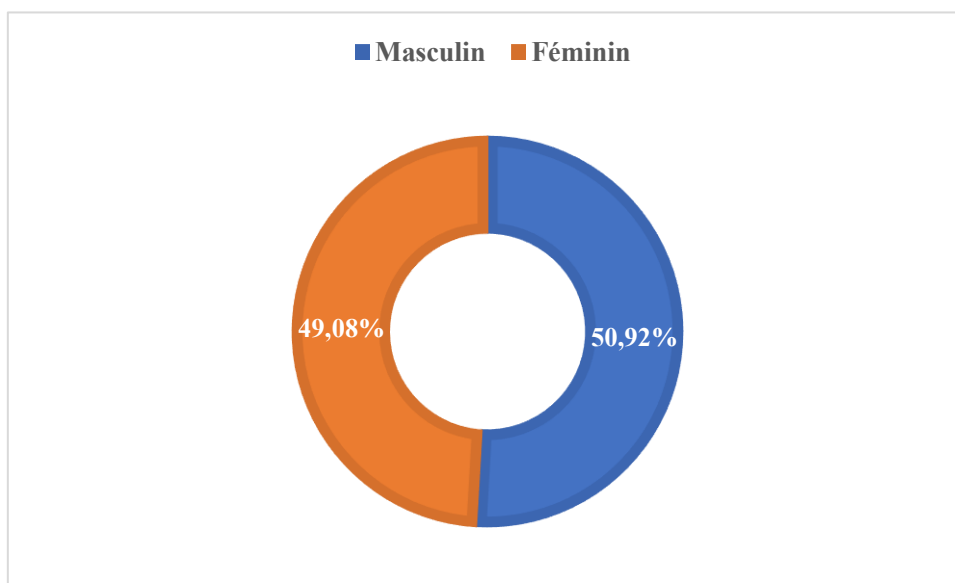


Figure 20. Répartition des nourrissons selon le sexe.

La répartition par sexe montre une légère prédominance masculine (50,92 %) par rapport aux nourrissons féminins (49,08 %), avec un sexe ratio de 1,04 (Figure 20).

L'âge des nourrissons au moment de l'enquête varie de 3 à 360 jours, avec une moyenne de 174,23 jours.

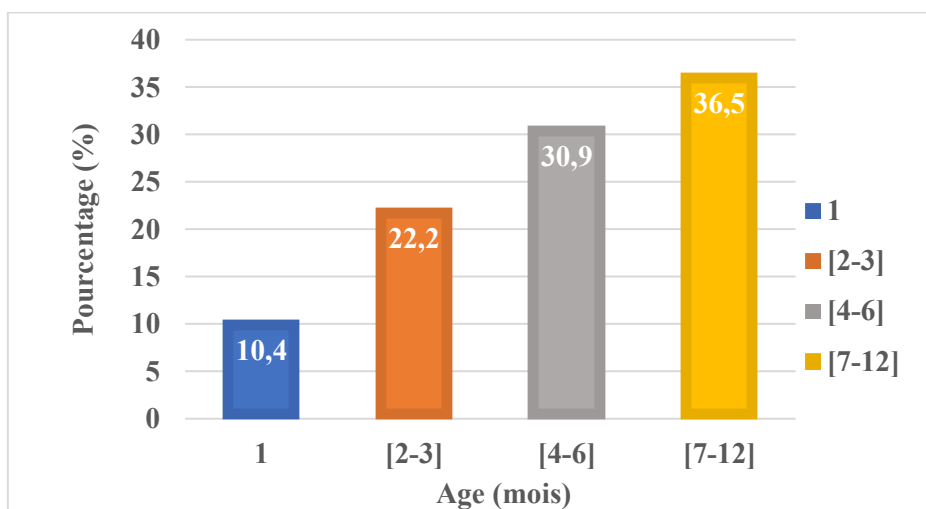


Figure 21. Répartition des nourrissons selon les catégories d'âge.

La majorité des nourrissons enquêtés appartiennent à la tranche d'âge de 7 à 12 mois (36,51 %), suivie par celles de 4 à 6 mois (30,88 %) et de 2 à 3 mois (22,19 %). Les nourrissons âgés de moins d'un mois représentent 10,42 % de l'échantillon (Figure 21).

2.2.2. Distribution pondérale des nourrissons à la naissance

Le poids de naissance des nourrissons enquêtés varie entre 1100 g et 6200 g, avec une moyenne de 3308,44 g et un écart type de 611,83 g.

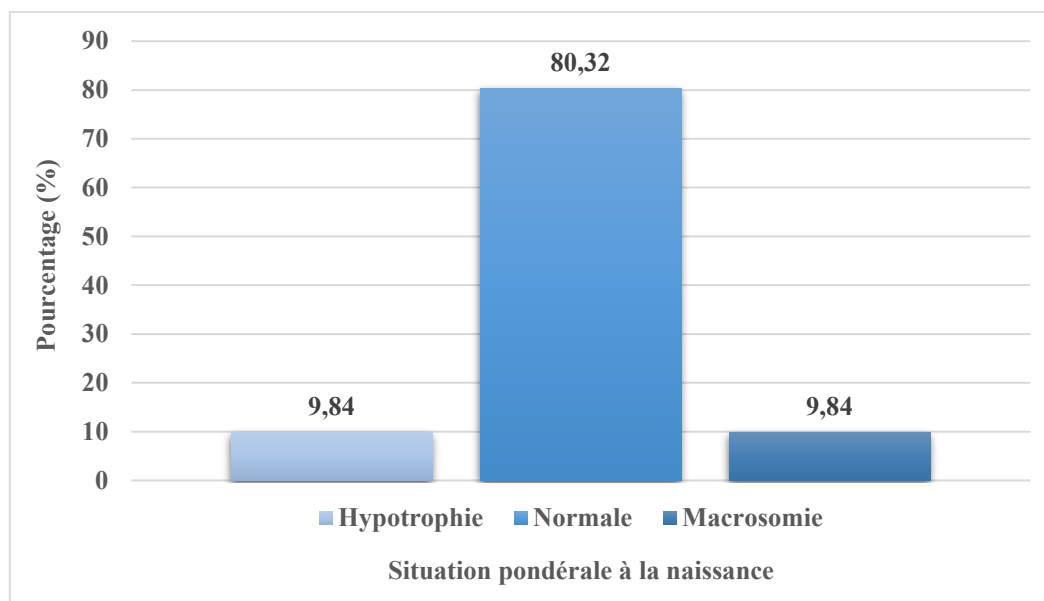


Figure 22. Répartition des nouveau-nés selon la classification pondérale à la naissance.

La majorité des nouveau-nés (80,32 %) présentent un poids de naissance normal, tandis que 9,84 % sont en situation d'hypotrophie et 9,84 % en situation de macrosomie (Figure 22).

2.2.3. Souffrance fœtale et statut staturo-pondéral actuel

Tableau 18. Répartition des nourrissons selon la présence d'une souffrance fœtale

| Souffrance fœtale | | |
|-------------------|--------------|-----------------|
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Oui | 155 | 17,73 |
| Non | 719 | 82,27 |
| Total | 874 | 100,00 |

Le tableau montre que parmi les nourrissons inclus dans l'étude, 155 (17,73 %) ont présenté des signes de souffrance fœtale pendant la grossesse u au moment de la naissance. A l'inverse, 719 nourrissons (82,27 %) n'ont manifesté aucun signe de souffrance fœtale.

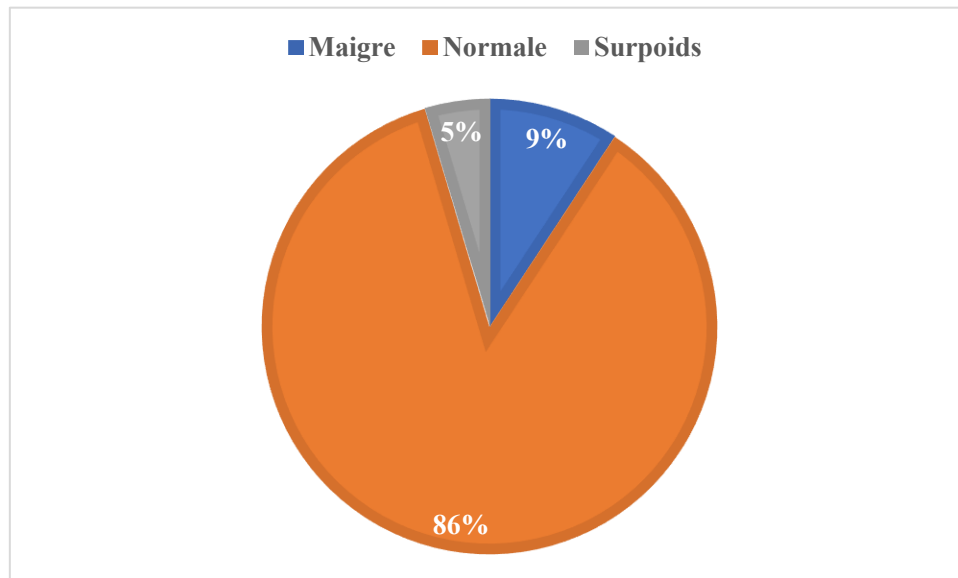


Figure 23. Répartition des nourrissons selon leur état staturo-pondéral actuel.

L'évaluation de l'état staturo-pondéral au moment de l'enquête montre que :

- **86,16 %** des nourrissons présentent un poids et une taille dans la norme ;
- **9,26 %** sont classés comme maigres ;
- **4,58 %** présentent un surpoids (Figure 23).

2.3. Modalités d'allaitement

2.3.1. Type d'allaitement actuel

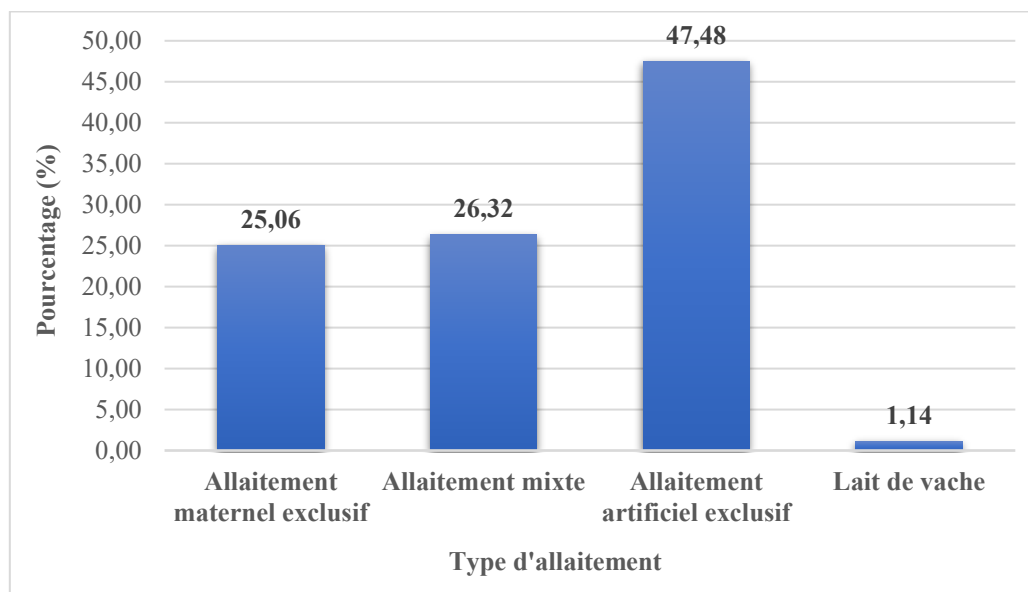


Figure 24. Répartition des nourrissons selon le mode d'alimentation au moment de l'enquête.

L'allaitement artificiel exclusif constitue la pratique la plus répandue dans cette population, adoptée par 47,48 % des mères. L'allaitement maternel exclusif concerne 25,06 % des répondantes, soit environ un quart de l'échantillon, tandis que 26,32 % des mères optent pour un allaitement mixte. L'utilisation du lait de vache reste marginale, ne concernant que 1,14 % des nourrissons (Figure 24).

Tableau 19. Age d'introduction du lait de vache.

| Age d'introduction du lait de vache (mois) | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
|--------------------------------------------|--------------|-----------------|
| 3 mois | 5 | 01,1 % |
| 4 mois | 197 | 41,9 % |
| 5 mois | 115 | 24,5 % |
| 6 mois | 111 | 23,6 % |
| 7 mois | 20 | 04,3 % |
| 8 mois | 12 | 02,6 % |
| 9-12 mois | 10 | 2,1 % (cumulé) |
| Total | 470 | 100,0 % |

L'introduction du lait de vache s'est faite surtout entre 4 et 6 mois, avec un pic à 4 mois (41,9 %). L'âge moyen est d'environ 5 mois. Les âges extrêmes observés vont de 3 mois à 12

mois, mais seules 2,1 % des mères ont attendu 9 mois ou plus, et moins de 1 % jusqu'à 12 mois (Tableau 19).

2.3.2. Motivations des mères pour le choix de l'allaitement maternel

Tableau 20. Répartition des mères selon les motivations déclarées en faveur de l'allaitement maternel.

| Motivation | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
|-------------------------------------------|--------------|-----------------|
| Meilleur pour la santé de l'enfant | 211 | 87,55 |
| Bienfaits pour la mère | 68 | 28,22 |
| Economique | 61 | 25,31 |
| Contact mère-enfant | 59 | 24,48 |
| Coutume familiale | 56 | 23,24 |
| Facile pour la pratique | 33 | 13,69 |
| Choix du mari | 15 | 06,22 |
| Refus du biberon | 10 | 04,15 |
| Total | 513 | 100,00 |

Les principales motivations invoquées par les mères pour allaiter leur enfant sont d'abord liées à des considérations de santé : 87,55 % des répondantes estiment que l'allaitement est bénéfique pour la santé de l'enfant. Viennent ensuite :

- Les avantages pour la mère (28,22 %)
- L'aspect économique (25,31 %)
- Le renforcement du lien mère-enfant (24,48 %)
- Les coutumes familiales (23,24 %)

Des raisons moins fréquemment évoquées incluent :

- La facilité d'allaiter (13,69 %)
- Le choix du conjoint (6,22 %)
- Le refus du biberon par l'enfant (4,15 %)

Ces dernières, bien que moins fréquentes, traduisent des influences culturelles, personnelles ou relationnelles spécifiques à certaines mères (Tableau 20).

2.3.3. Période de prise de décision pour l'allaitement maternel et moment de mise au sein

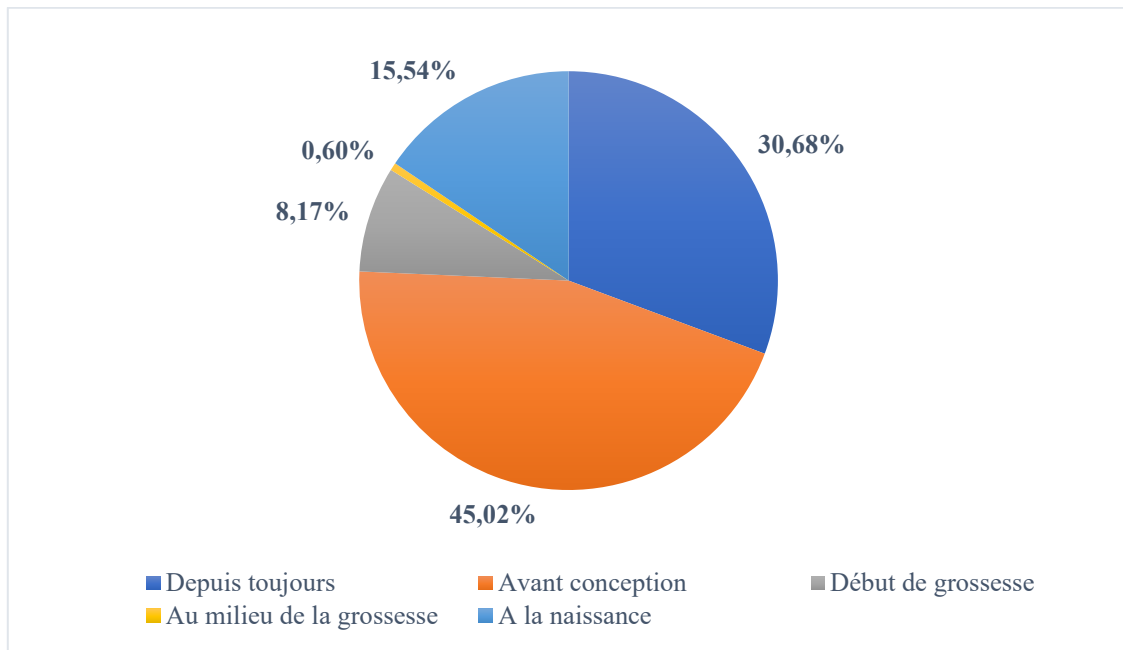


Figure 25. Période de décision des mères concernant l'allaitement maternel.

La majorité des mères (45,02 %) ont déclaré avoir pris la décision d'allaiter avant même la conception. Environ 30,68 % affirment avoir toujours eu l'intention d'allaiter. D'autres ont pris cette décision à des moments plus spécifiques : 15,54 % à la naissance, 8,17 % au début de la grossesse, et seulement 0,60 % au cours du deuxième trimestre (Figure 25).

Tableau 21. Moment de la première mise au sein après l'accouchement.

| Première mise au sein | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
|-----------------------------------------------------|--------------|-----------------|
| Immédiatement après accouchement | 219 | 43,63 |
| 1^{er} jour d'accouchement | 11 | 02,19 |
| 2^{ème} jour d'accouchement | 36 | 07,17 |
| 3^{ème} jour d'accouchement | 211 | 42,03 |
| Après le 3^{ème} jour d'accouchement | 25 | 04,98 |
| Total | 502 | 100,00 |

Les résultats de l'enquête indiquent que la première mise au sein a lieu principalement immédiatement après l'accouchement (43,63 %) ou le troisième jour (42,03 %). En revanche, 7,17 % des mères ont initié l'allaitement le deuxième jour, tandis qu'environ 5,00 % ne l'ont commencé qu'après le troisième jour (Tableau 21).

2.3.4. Motivations pour le choix de l'allaitement artificiel

Tableau 22. Raisons du choix de l'allaitement artificiel.

| Motivation | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
|---------------------------------------|--------------|-----------------|
| Nouvelle grossesse | 10 | 01,56 |
| Manque de lait maternel | 317 | 49,38 |
| Maladie de la maman/hospitalisation | 87 | 13,55 |
| Maladie de l'enfant/hospitalisation | 57 | 08,88 |
| Préserver l'esthétique de la poitrine | 07 | 01,09 |
| Césarienne | 55 | 08,57 |
| Problèmes de seins | 23 | 03,58 |
| Facilité à reprendre le travail | 109 | 16,98 |
| Facilité de l'allaitement artificiel | 44 | 06,85 |
| Refus de tétée | 93 | 14,49 |
| Total | 802 | 100,00 |

Chez la population étudiée, le principal motif ayant conduit au recours à l'allaitement artificiel est l'insuffisance de lait maternel, rapportée par 49,38 % des mères. D'autres raisons ont également été évoquées, telles que le refus de téter de l'enfant (14,49 %), la nécessité de reprendre le travail plus aisément (16,98 %), ainsi que la maladie ou l'hospitalisation de la mère (13,55 %). Des causes plus marginales ont été mentionnées, notamment une nouvelle grossesse (1,56 %) ou la volonté de préserver l'apparence esthétique de la poitrine (1,09 %) (Tableau 22).

2.3.5. Période de prise de décision pour l'allaitement artificiel

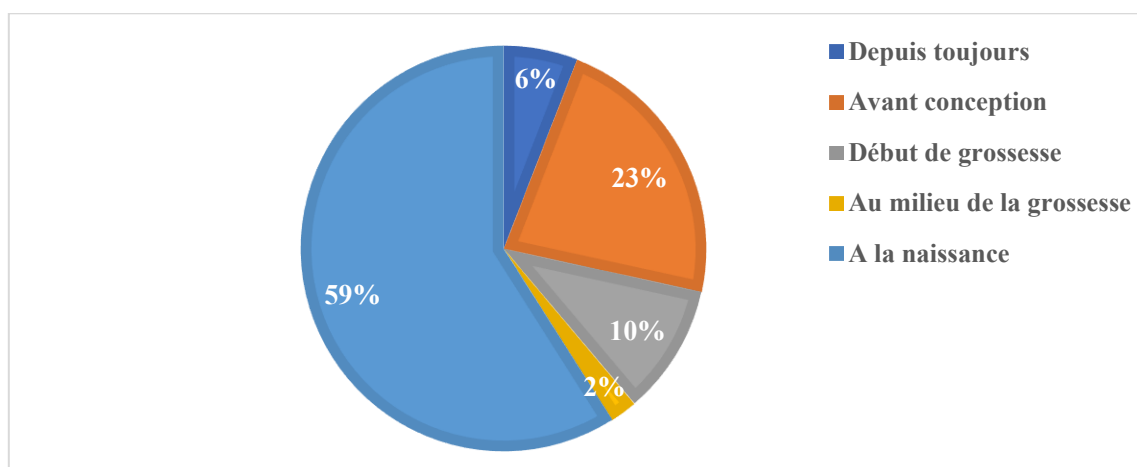


Figure 26. Répartition des mères selon le moment de leur décision.

La plupart des mères (59,01 %) ont opté pour l'allaitement artificiel après la naissance de leur enfant, tandis que 10,40 % ont pris cette décision dès le début de la grossesse. Une proportion plus réduite, soit 5,90 %, avait toujours envisagé ce mode d'allaitement, et seulement 2,17 % ont fait ce choix au cours du deuxième trimestre (Figure 26).

2.4. Pratiques alimentaires et choix des mères

2.4.1. Répartition des marques de lait infantile utilisées par les mères interrogées

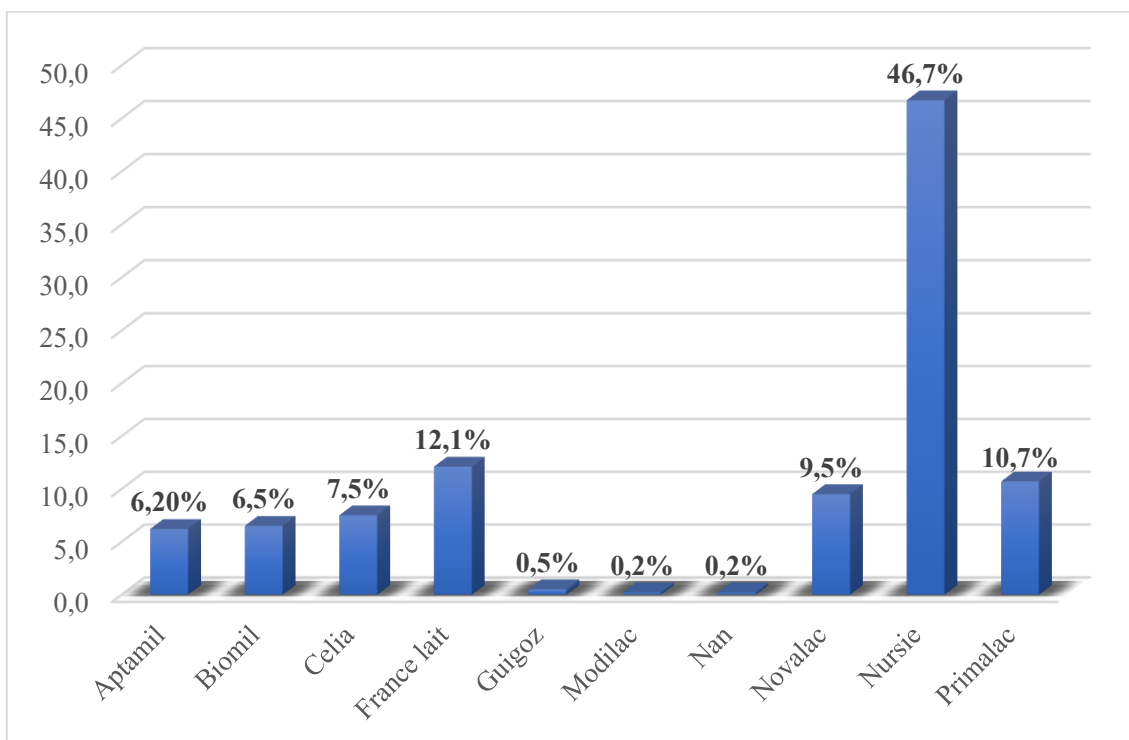


Figure 27. Répartition des marques de lait infantile utilisées par les mères.

Le graphique illustre la répartition des marques de lait infantile utilisées par les mères interrogées. La marque Nursie® arrive largement en tête avec 46,70 % des utilisations, suivie de France Lait® (12,10 %), Primalac® (10,70 %) et Novalac® (9,50 %). D'autres marques telles que Celia® (7,50 %), Biomil® (6,50 %) et Aptamil® (6,20 %) sont également représentées, mais dans des proportions moindres. En revanche, Guigoz® (0,50 %), Modilac® (0,20 %) et Nan® (0,20 %) sont très peu choisies (Figure 27).

2.4.2. Pratiques liées à la fréquence des biberons, à la réutilisation et au choix de l'eau utilisée

Tableau 23. Nombre de biberons consommés par jour et type d'eau utilisée.

| Nombre de biberons par 24H | | |
|-------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| < 3 | 92 | 14,30 |
| [3-6] | 339 | 52,70 |
| [7-10] | 159 | 24,70 |
| > 10 | 53 | 08,30 |
| Total | 643 | 100,00 |
| Réutilisation du biberon déjà préparé après 2H | | |
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Oui | 155 | 24,10 |
| Non | 489 | 75,90 |
| Total | 643 | 100,00 |
| Type d'eau utilisée pour la préparation des biberons | | |
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Eau en bouteille | 577 | 89,74 |
| Eau de source naturelle | 03 | 00,47 |
| Eau de citerne | 14 | 02,18 |
| Eau du robinet | 49 | 07,62 |
| Total | 643 | 100,00 |
| Marques d'eau en bouteille utilisées | | |
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| N'importe quelle marque | 319 | 55,09 |
| Besbessa | 122 | 21,07 |
| Ifri | 44 | 07,61 |
| Aïn Bouglez | 40 | 06,91 |
| Lalla Khedidja | 05 | 00,86 |
| Youkous | 03 | 00,52 |
| Djurdjura | 16 | 02,76 |
| Guedila | 30 | 05,18 |
| Total | 579 | 100,00 |

La majorité des mères (52,7 %) donnent à leur enfant entre 3 et 6 biberons par jour, tandis que 24,7 % en administrent entre 7 et 10. En revanche, 14,3 % donnent moins de 3 biberons, et 8,30 % dépassent les 10 biberons quotidiens. Le nombre moyen de biberons par jour est d'environ 5, avec des extrêmes allant de 1 à 14 biberons.

En ce qui concerne la réutilisation des biberons déjà préparés, une majorité de mères (75,9 %) ne le font pas, tandis que 24,1 % déclarent les réutiliser après un délai de 2 heures.

Pour la préparation des biberons, l'eau en bouteille est largement privilégiée (89,74 %). Toutefois, certaines mères utilisent de l'eau du robinet (7,61 %), de l'eau de citerne (2,18 %) ou encore de l'eau de source naturelle (0,47 %).

Concernant le choix de la marque d'eau en bouteille, plus de la moitié des mères (55,09 %) n'ont pas de préférence et utilisent celle qui est disponible. D'autres montrent un attachement à certaines marques : Besbessa (21,07 %), Ifri (7,61 %), Bouglez (6,91 %), Guedila (5,18 %), Djurdjura (2,76 %), Lalla Khedidja (0,86 %) et Youkous (0,52 %) (Tableau 23).

2.4.3. Evolution des volumes de lait administrés selon l'âge des nourrissons

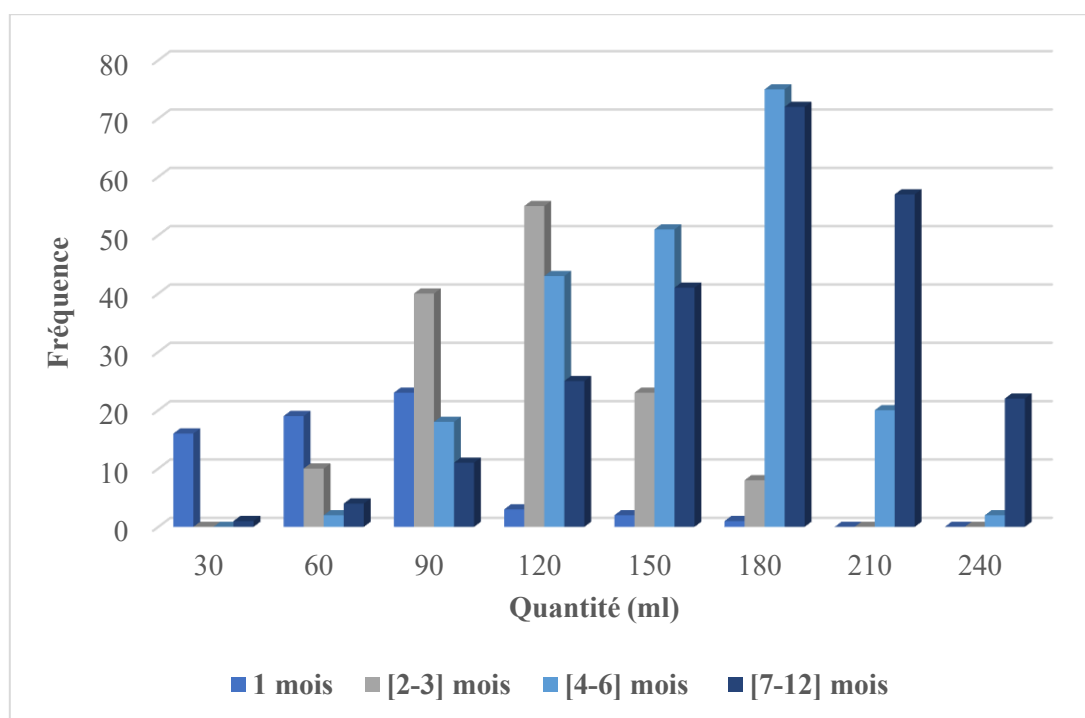


Figure 28. Volume de lait préparé en fonction de l'âge du bébé.

Les quantités de lait préparées par les mères varient considérablement, avec une moyenne de 145,30 ml par biberon, un minimum de 30 ml et un maximum de 240 ml. L'écart type, estimé à 49,42 ml, reflète cette diversité.

On observe une augmentation progressive de la quantité de lait en fonction de l'âge des nourrissons. Les nourrissons âgés de 4 à 6 mois consomment majoritairement entre 90 ml et 150 ml par prise, des volumes également fréquents chez les enfants de 7 à 12 mois. En revanche,

les volumes plus faibles (30 ml ou 60 ml) deviennent rares à partir de 4 mois. Chez les nourrissons d'un mois, les quantités les plus courantes sont de 30 ml ou 60 ml par biberon (Figure 28).

2.4.4. Pratiques de chauffage de l'eau : préférences des mères et types de casseroles utilisées

Tableau 24. Modes de chauffage de l'eau et types d'ustensiles utilisés.

| Moyens de chauffage de l'eau pour biberon | | |
|--------------------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Casserole | 607 | 98,06 |
| Chauffe biberon | 07 | 01,14 |
| Micro-onde | 05 | 00,80 |
| Total | 619 | 100,00 |
| Matériaux des casseroles utilisées | | |
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Aluminium | 350 | 57,66 |
| Inox | 221 | 36,41 |
| Granite | 14 | 02,31 |
| Verre | 05 | 00,82 |
| Fonte | 17 | 02,80 |
| Total | 607 | 100,00 |

Les résultats indiquent que la casserole est de loin le moyen de chauffage de l'eau le plus utilisé pour la préparation des biberons, représentant 98,06 % des cas. Les autres méthodes, telles que le chauffe-biberon (1,14 %) et le micro-ondes (0,80 %), restent marginales.

Concernant les matériaux des casseroles employées, l'aluminium domine largement avec 57,66 % des utilisations, suivi par l'inox (36,41 %). Les matériaux plus rares incluent la fonte (2,80 %), le granite (2,31 %) et le verre (0,82 %) (Tableau 24).

2.5. Diversification alimentaire et antécédents médicaux des nourrissons

2.5.1. Age de début et modalités de la diversification alimentaire

Tableau 25. Répartition des nourrissons selon l'introduction et l'âge de diversification alimentaire.

| Diversification alimentaire | | |
|------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| Oui | 472 | 54,00 |
| Non | 402 | 46,00 |
| Total | 874 | 100,00 |
| Age de diversification | | |
| Sous-catégorie | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
| < 6 mois | 318 | 67,37 |
| ≥ 6 mois | 154 | 32,63 |
| Total | 472 | 100,00 |

Concernant la diversification alimentaire, 54 % des mères interrogées ont déclaré l'avoir déjà entamée avec leur nourrisson, contre 46 % qui ne l'avaient pas encore commencée au moment de l'enquête.

Parmi celles ayant amorcé cette transition, une majorité (67,37 %) l'a initiée avant l'âge de 6 mois, tandis que 32,63 % l'ont commencée à 6 mois ou plus.

L'analyse statistique révèle un âge moyen de début de diversification de 5,07 mois, avec un écart type de 1,32 mois. Les âges de début observés varient entre 3 mois (minimum) et 12 mois (maximum) (Tableau 25).

2.5.2. Antécédents médicaux des nourrissons

Tableau 26. Pathologies observées chez les nourrissons dans les premiers jours de vie

| Antécédents | Effectif (n) | Pourcentage (%) |
|--------------------------|--------------|-----------------|
| Aucun | 801 | 91,65 % |
| Détresse respiratoire | 15 | 01,72 % |
| Epilepsie | 05 | 00,57 % |
| COVID | 01 | 00,11 % |
| Pneumothorax | 02 | 00,23 % |
| Rougeole | 02 | 00,23 % |
| Reflux Gastro-Œsophagien | 02 | 00,32 % |
| Ictère | 10 | 01,14 % |
| Bronchiolite | 36 | 04,12 % |
| Total | 874 | 100 % |

L'analyse des antécédents médicaux précoces montre que la grande majorité des nourrissons (91,65 %) n'a présenté aucun problème de santé.

Parmi les cas rapportés, les affections respiratoires sont les plus fréquentes, en particulier la bronchiolite (4,12 %) et la détresse respiratoire (1,72 %) (Tableau 26).

2.6. Répartition des nourrissons selon le statut vaccinal et le nombre de vaccins en retard

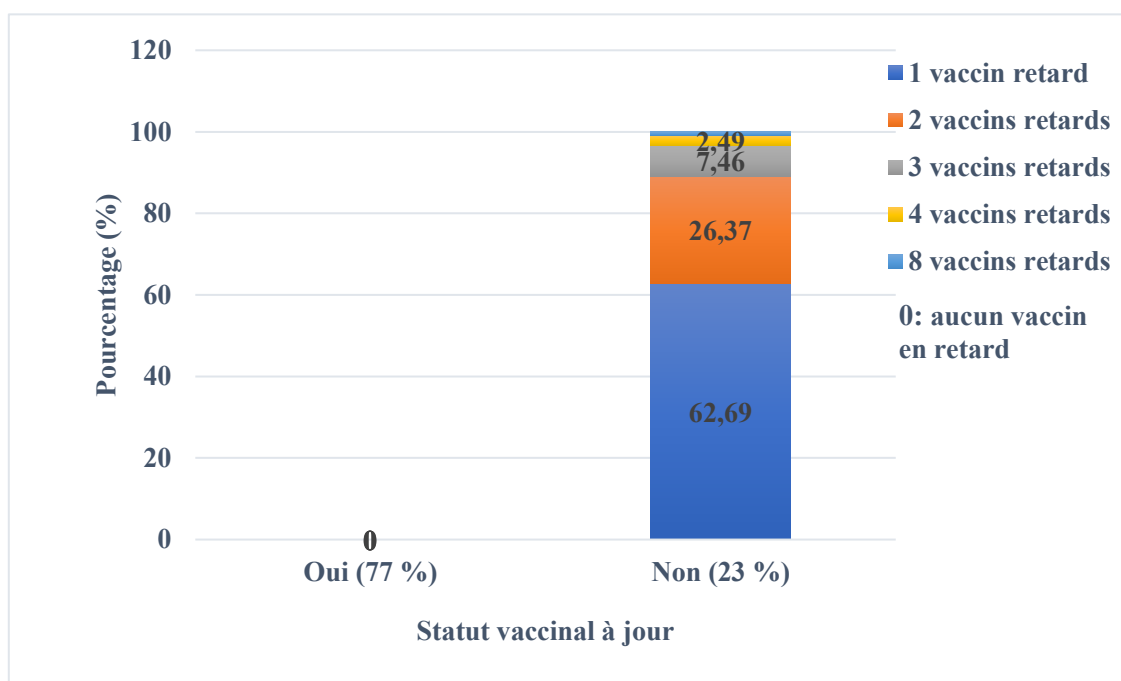


Figure 29. Statut vaccinal des nourrissons et nombre de vaccins en retard.

Le graphique présente la distribution des nourrissons selon leur statut vaccinal et le nombre de vaccins en retard. Il en ressort que 77 % des nourrissons ont un calendrier vaccinal conforme à leur âge. Parmi les 23 % affichant un retard, la majorité accusent un léger décalage, avec un ou deux vaccins manquants (respectivement 62,69 % et 26,37 %). Les retards plus importants demeurent marginaux (Figure 29).

2.7. Analyse des facteurs influençant le choix de l'allaitement

Une analyse par régression logistique a été réalisée afin d'examiner les facteurs influençant le choix de l'allaitement chez les mères de nourrissons.

Tableau 27. Critères d'ajustement et tests de vraisemblance du modèle logistique.

| Modèle | Critères d'ajustement du modèle | Tests du rapport de vraisemblance | | |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----|---------|
| | Log de vraisemblance -2 | Khi-deux | ddl | Sig. |
| Constante uniquement | 817,822 | - | - | - |
| Final | 549,899 | 267,923 | 48 | < 0,001 |

Ce tableau présente les critères d'ajustement ainsi que les tests de vraisemblance appliqués au modèle logistique visant à analyser les facteurs influençant le choix de l'allaitement. Le logarithme de vraisemblance à -2 s'élève à 817,822 lorsque le modèle ne contient que le terme constant. Après l'introduction des variables explicatives, cette valeur diminue à 549,899, traduisant ainsi une amélioration notable de l'adéquation du modèle aux données.

Le test du khi-deux associé donne une valeur de 267,923, avec 48 degrés de liberté, et une p-value inférieure à 0,001. Ce résultat indique que l'ajout des variables explicatives contribue de manière significative à l'ajustement du modèle. En somme, le modèle final s'avère statistiquement significatif, ce qui confirme sa pertinence pour l'étude des déterminants de l'allaitement et souligne la contribution explicative des variables retenues (Tableau 27).

Tableau 28. Indicateurs de qualité d'ajustement du modèle logistique selon le pseudo R²

| Pseudo R ² | |
|-----------------------|-------|
| Cox et Snell | 0,264 |
| Nagelkerke | 0,301 |
| McFadden | 0,146 |

Le pseudo R^2 de Nagelkerke obtenu est de 0,301, ce qui suggère que le modèle présente une qualité d'ajustement satisfaisante pour l'analyse des facteurs associés à l'allaitement artificiel exclusif. Les pseudo R^2 sont des mesures adaptées à la régression logistique et permettent d'évaluer la performance relative du modèle. Contrairement au coefficient de détermination R^2 utilisé en régression linéaire, ces indices ne reflètent pas directement le pourcentage de variance expliquée, mais fournissent une indication utile sur l'amélioration de l'ajustement du modèle par rapport à un modèle nul (Tableau 28).

Tableau 29. Facteurs prédictifs du type de l'allaitement.

| Effet | Critères d'ajustement du modèle | Tests du rapport de vraisemblance | | |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|-----|---------|
| | Log de vraisemblance -2 du modèle réduit | Khi-deux | ddl | p-value |
| Constante | 549,899 ^a | 0,000 | 0 | - |
| Age de la maman | 403,720 | 04,852 | 9 | 0,847 |
| Niveau d'études | 434,612 | 35,744 | 12 | < 0,001 |
| Lieu d'habitat | 411,391 | 12,523 | 6 | 0,051 |
| Femme active | 564,002 | 14,104 | 2 | 0,001 |
| Nombre d'enfants | 559,961 | 10,062 | 4 | 0,039 |
| La fratrie de ce bébé a été allaitée | 686,901 | 137,002 | 4 | 0,000 |
| Mode du dernier accouchement | 559,661 | 09,762 | 2 | 0,008 |
| Nombre d'heures de travail par semaine | 571,434 | 21,535 | 8 | 0,006 |
| Parité | 549,899 ^a | 0,000 | 0 | - |
| Age gestationnel du dernier accouchement | 559,219 | 9,320 | 4 | 0,054 |
| Situation pondérale à la naissance | 555,826 | 5,927 | 4 | 0,205 |
| Notion de souffrance fœtale | 400,761 | 1,893 | 3 | 0,595 |
| Infection respiratoire aigüe du nourrisson à la naissance | 552,104 | 2,206 | 2 | 0,332 |
| Antécédents médicaux de l'enfant | 574,269 | 24,371 | 16 | 0,082 |

La statistique du khi-deux représente la différence entre le modèle final et un modèle réduit dans les logs de vraisemblance -2. Le modèle réduit est formé en omettant un effet du modèle final. L'hypothèse nulle stipule que tous les paramètres de cet effet sont égaux à 0.

a : Ce modèle réduit est équivalent au modèle final, car l'omission d'un effet n'augmente pas les degrés de liberté.

Le tableau 29 présente les résultats du test de vraisemblance issus du modèle logistique utilisé pour identifier les facteurs associés au type d'allaitement choisi par la mère.

Plusieurs variables ressortent comme significativement associées à la pratique de l'allaitement

- **Niveau d'études** ($p < 0,001$) : Cette variable montre une association hautement significative avec le type d'allaitement.
- **Statut professionnel (femme active)** ($p = 0,001$) : Le fait d'exercer une activité professionnelle est significativement lié au type d'allaitement.
- **Nombre d'enfants** ($p = 0,039$) : Le nombre d'enfants constitue également un facteur prédictif ; les mères multipares adoptent souvent des pratiques différentes de celles des primipares.
- **Antécédents d'allaitement dans la fratrie** ($p < 0,001$) : Cet historique constitue un déterminant majeur du choix actuel, révélant une forte continuité des pratiques au sein de la famille.
- **Mode d'accouchement** ($p = 0,008$) : Le type d'accouchement (voie basse ou césarienne) exerce une influence significative sur le type d'allaitement adopté.
- **Nombre d'heures de travail hebdomadaires** ($p = 0,006$) : Cette variable est également prédictive du choix d'allaitement, reflétant l'impact de la disponibilité de la mère.

D'autres variables, bien que proches du seuil de significativité, n'atteignent pas le niveau conventionnel de 0,05 :

- **Age gestationnel au moment de l'accouchement** ($p = 0,054$) et **lieu de résidence** ($p = 0,051$).

Enfin, certaines variables n'ont pas montré d'association significative avec le type d'allaitement :

- **Poids de naissance** ($p = 0,205$), **infections respiratoires aiguës** ($p = 0,332$), **antécédents médicaux de l'enfant** ($p = 0,082$), **âge maternel** ($p = 0,847$) et **souffrance fœtale** ($p = 0,595$).

Tableau 30. Tableau récapitulatif des Odds Ratios significatifs

| Variable indépendante | Catégorie | OR | IC 95 % (Inférieur – Supérieur) | p-value |
|----------------------------------------|--------------------------|------------|------------------------------------|---------|
| Niveau d'études | Primaire | 2,261 | 1,058 – 4,833 | 0,035 |
| Femme active | Oui | 3000662,77 | 223443,654 – 40296409,915 | < 0,001 |
| La fratrie allaitée | Au sein exclusivement | 6,215 | 3,563 – 10,841 | < 0,001 |
| La fratrie allaitée | Au biberon exclusivement | 0,319 | 0,182 – 0,559 | < 0,001 |
| Mode d'accouchement | Voie basse | 1,714 | 1,172 – 2,506 | 0,005 |
| Nombre d'heures de travail par semaine | < 10 Heures de travail | 352909,94 | 234283,856 – 53159829,978 | < 0,001 |

Ce tableau présente les odds ratios (OR) des variables indépendantes significativement associées à la probabilité de recourir à l'allaitement artificiel exclusif. Chaque OR est accompagné de son intervalle de confiance à 95 % (IC 95 %) ainsi que de la valeur p associée, indiquant le niveau de significativité statistique. Ces résultats permettent d'interpréter la force et le sens de l'association entre chaque facteur et la pratique de l'allaitement artificiel exclusif.

L'analyse des odds ratios met en évidence plusieurs facteurs significativement associés au choix de l'allaitement artificiel exclusif. Le niveau d'études apparaît comme un déterminant important : les mères ayant un niveau d'instruction primaire présentent une probabilité 2,26 fois plus élevée d'opter pour l'allaitement artificiel, comparativement à celles ayant un niveau d'études plus élevé ($p = 0,035$). De même, le statut professionnel joue un rôle déterminant : être une femme active augmente considérablement la probabilité de recourir à l'allaitement artificiel exclusif, avec un odds ratio très élevé et hautement significatif ($p < 0,001$), ainsi, les contraintes professionnelles influencent fortement cette pratique.

L'analyse montre que les antécédents familiaux en matière d'allaitement influencent significativement la pratique. Les mères dont les enfants précédents ont été allaités exclusivement au sein présentent une probabilité 6,2 fois moindre de recourir à l'allaitement

artificiel exclusif pour leur nouveau-né ($p < 0,001$), ce qui souligne l'effet protecteur fort de l'allaitement familial antérieur contre l'adoption du biberon.

De plus, le mode d'accouchement influence également le type d'allaitement adopté. Les femmes ayant accouché par voie basse ont une probabilité 1,7 fois plus faible de recourir à l'allaitement artificiel exclusif par rapport à celles ayant accouché par césarienne ($p = 0,005$). Enfin, le nombre d'heures de travail par semaine constitue un facteur significatif : les mères travaillant moins de 10 heures par semaine ont une probabilité bien plus élevée d'allaiter leur enfant, ce qui souligne l'importance de la disponibilité temporelle dans le maintien de l'allaitement maternel exclusif ($p < 0,001$).

Tableau 31. Variables non significativement associées au type d'allaitement – Résultats du modèle logistique

| Variable indépendante | Catégorie | OR | IC 95 % (Inférieur – Supérieur) | p-value |
|------------------------------------|-------------|-------|------------------------------------|---------|
| Age de la mère | < 20 ans | 0,222 | 0,013 – 3,762 | 0,297 |
| Age gestationnel à la naissance | Prématuré | 0,402 | 0,109 – 1,482 | 0,171 |
| Situation pondérale à la naissance | Hypotrophie | 0,513 | 0,207 – 1,276 | 0,151 |
| Lieu d'habitat | Semi-Urbain | 1,037 | 0,162 – 6,618 | 0,051 |
| Notion de souffrance fœtale | Oui | 1,131 | 0,223 – 5,731 | 0,882 |
| Infection respiratoire aiguë | Oui | - | - | 0,332 |

Ce tableau présente les variables indépendantes dont l'analyse statistique n'a pas révélé de lien significatif avec le recours à l'allaitement artificiel exclusif. Les valeurs des odds ratios (OR), des intervalles de confiance à 95 % (IC 95 %) et des p-values indiquent l'absence d'association statistiquement significative pour chacune des variables testées.

Le modèle logistique a permis d'identifier plusieurs variables qui ne présentent pas d'association statistiquement significative avec le choix du type d'allaitement. L'âge de la mère, en particulier pour les mères de moins de 20 ans (OR = 0,222 ; $p = 0,297$), ne semble pas influencer significativement la pratique de l'allaitement.

De même, l'âge gestationnel à la naissance (prématurité), la situation pondérale à la naissance (hypotrophie) et le lieu de résidence (semi-urbain) affichent des p-values respectives de 0,171, 0,151 et 0,051, cette dernière étant proche du seuil de significativité sans toutefois l'atteindre.

Par ailleurs, la notion de souffrance fœtale au moment de l'accouchement ($p = 0,882$) et la survenue d'une infection respiratoire aiguë chez le nourrisson ($p = 0,332$) ne montrent pas de lien significatif avec le type d'allaitement choisi. Ces résultats suggèrent que, dans cette population, les facteurs biologiques et médicaux étudiés n'ont pas d'impact majeur sur la décision d'allaitement, contrairement aux variables socio-économiques et contextuelles précédemment identifiées comme significatives.

3. Discussion

Les résultats de cette étude, menée auprès de 874 mères dans la wilaya d'Annaba, mettent en lumière les multiples dimensions qui influencent les pratiques d'allaitement et d'alimentation du nourrisson dans un contexte social, culturel et sanitaire spécifique. Trois grands axes se dégagent de l'analyse, chacun faisant l'objet d'un développement détaillé dans les sections suivantes :

3.1. Déterminants socioprofessionnels et culturels du choix d'allaitement

L'analyse des caractéristiques sociodémographiques des mères participantes montre une population relativement homogène avec une prédominance de mères au foyer (70,42 %). Sur le plan obstétrical, la fréquence élevée des césariennes (62,01 %) est notable, largement supérieure à celle rapportée dans certaines études nationales comme celle de *Mecheri-Touati et al. (2014)* [179].

Les résultats indiquent une nette prédominance de l'allaitement artificiel exclusif (47,48 %), contrastant avec les recommandations de l'OMS qui préconisent un allaitement maternel exclusif jusqu'à 6 mois [21]. Ce taux est bien supérieur à celui rapporté par *Boumaraf et Nezzal (2010)* à Constantine (17,3 %), [180] mais proche de celui observé par *Zehnati et Sidi-Yakhlef (2024)*, qui situent l'allaitement maternel exclusif à 6 mois autour de 28,7 % [132], ou encore *Bekhtaoui Assia (2021)* avec 28,27 % [178]. Cela traduit une amélioration par rapport aux 7 % signalés en 2006 (OMS), mais montre que les objectifs de santé publique restent encore loin d'être atteints.

Sur le plan continental, *Lauer et al. (2004)* ont évalué l'allaitement exclusif dans 135 pays en développement et ont trouvé une prévalence de 24,9 %, un taux très proche du nôtre [181].

En Europe, les taux d'allaitement exclusif varient considérablement d'un pays à l'autre. En France, l'étude de *Charpentier (2012)* a révélé un taux d'allaitement artificiel de 16,5 % dans la maternité du CHU de Grenoble, ce qui est nettement inférieur aux 48 % observés dans notre étude [182].

Les principales motivations des mères pour choisir l'allaitement maternel sont d'abord liées aux bénéfices pour la santé de l'enfant (87,55 %), suivies par les avantages pour la mère (28,22 %), les considérations économiques (25,31 %) et l'importance du lien mère-enfant (24,48 %).

Nos résultats sont en accord avec ceux de *Siret et al. (2008)*, qui rapportent que 74 % des mères interrogées ont justifié leur choix par les bénéfices du lait maternel pour l'enfant [183]. De même, l'étude de *Sqalli Houssaini et al. (2017)*, menée au Maroc auprès de 275 mères à Rabat montre que 96 % des femmes ont choisi l'allaitement pour ses bienfaits sur l'enfant, tandis que 41 % évoquent la relation privilégiée mère-enfant et 34 % les avantages pour la mère [184]. En France, l'enquête de *S. Fanello (2003)*, réalisée auprès de 308 femmes révèle que 88 % d'entre elles considéraient le lait maternel comme un aliment parfaitement adapté, tandis que 82 % soulignaient son rôle dans le maintien du lien mère-enfant. Par ailleurs, le rôle du conjoint dans la prise de décision semble limité : il n'a été consulté que par 14 % des mères en France (*Fanello, 2003*) et seulement 6,22 % dans notre étude [185].

La décision d'allaiter a été prise principalement avant la conception (45,02 %) ou depuis toujours (30,68 %), ce qui traduit une planification anticipée et une forte intention de pratiquer l'allaitement maternel.

De plus, notre enquête montre que la première mise au sein a lieu principalement juste après l'accouchement (43,63 %) ou au troisième jour (42,03 %). Ces taux sont supérieurs à ceux observés dans d'autres études. En effet, *Sqalli Houssaini et al. (2017, Maroc)* rapportent que seulement 34 % des femmes mettent leur enfant au sein le jour de l'accouchement, tandis que plus de la moitié commencent à allaiter le lendemain [184]. Ces résultats diffèrent également de ceux obtenus par *Siret et al. (2008)*, qui ont montré que 67 % des nourrissons étaient mis au sein dans les trois heures suivant la naissance [183].

La perception d'un manque de lait constitue la principale cause invoquée pour l'introduction du lait industriel (49,38 %). Ce constat rejoint les observations de *Wakamb Kanteng et al. (2014, Lubumbashi)*, où l'insuffisance de lait maternel était la raison la plus évoquée par 17 mères sur 52 [186]. De même, *Sqalli Houssaini et al. (2017, Maroc)* rapportent que 44 % des mères perçoivent leur production lactée comme insuffisante, influençant ainsi leur décision d'introduire du lait industriel [184]. En *Côte d'Ivoire*, *Mouroufie et al. (2019)* ont observé un taux plus bas (19,34 % des mères), ce qui pourrait être lié à une perception différente de l'insuffisance lactée [187].

D'autres raisons sont également citées pour justifier l'introduction du lait artificiel. La reprise du travail constitue un frein majeur à l'allaitement maternel pour 17 % des mères dans notre étude, un chiffre bien inférieur à celui rapporté au Maroc (50 %) [184]. Dans une étude menée

par *S. Fanello (2003, France)*, les raisons du choix de l'allaitement artificiel mettent également en évidence l'impact du travail ; 22 % des mères indiquent spécifiquement la reprise du travail comme facteur déterminant, un chiffre plus proche de nos résultats (17 %) [185].

Les maladies maternelles (13,55 %) ainsi que la césarienne (8,57 %) figurent parmi les raisons évoquées pour ne pas allaiter. La préservation de l'esthétique de la poitrine, quant à elle, n'a été mentionnée que par 1,09 % des mères. Ce dernier facteur mérite une attention particulière lorsqu'il est comparé aux résultats de *Mouroufie et al. (2019)*, où 40,50 % des mères identifient les préoccupations esthétiques comme un obstacle majeur à l'allaitement. Cette divergence marquée entre les deux études pourrait s'expliquer par des différences culturelles, religieuses, ainsi que par des normes de beauté propres à chaque région [187].

Nos données indiquent que la majorité des mères ayant opté pour l'allaitement artificiel (59 %) ont pris cette décision après la naissance de leur enfant. Par ailleurs, 10,4 % des mères ont fait ce choix dès le début de la grossesse, invoquant principalement des raisons médicales, telles que des pathologies chroniques nécessitant des traitements incompatibles avec l'allaitement, ou des limitations physiques, comme l'arthrose cervicale, entravant les postures adéquates pour l'allaitement. A titre comparatif, l'étude de *Sqalli Houssaini et al. (2017, Maroc)* rapporte que 40 % des femmes avaient déjà l'intention d'avoir recours au lait artificiel avant même la naissance [184].

L'analyse par régression logistique a permis d'identifier plusieurs facteurs significativement associés au choix de l'allaitement.

Parmi ces facteurs associés, le statut professionnel des mères se distingue avec un OR très élevé, confirmant les résultats de *Fanello (2003)* et de *Zehmati et Sidi-Yakhlef (2024)*, qui montrent que les mères au foyer allaitent plus longtemps (OR = 1,49) et que l'emploi réduit les chances de maintenir un allaitement exclusif [132,185].

Le mode d'accouchement, notamment la césarienne (62,01 %), est également un facteur limitant. Ce constat est appuyé par *Kersuzan et al. (2011)* en France, qui montrent une réduction de 32 % de l'allaitement maternel en cas de césarienne, ainsi que *Siret et al. (2008)*, qui relèvent une meilleure continuité de l'allaitement en cas d'accouchement physiologique [183,188].

L'expérience antérieure d'allaitement influence fortement les choix actuels. Les mères ayant allaité exclusivement au sein leurs enfants précédents ont un OR de 6,215, tandis que celles ayant utilisé uniquement le biberon présentent un OR de 0,319, comme l'ont montré *Lemarchand (2018)* [189] en France (OR = 2,5) et *Siret et al. (2008)* [183].

Enfin, le niveau d'éducation est aussi un facteur significatif : les mères ayant un niveau d'études supérieur initient plus fréquemment l'allaitement maternel, comme observé par *Robert et al. (2014, Belgique)* (OR = 3,5), *Siret et al. (2008, France)* (OR = 2,2) et *Bekhtaoui* en Algérie [183,190,191].

Certaines variables étudiées n'ont pas montré d'association statistiquement significative avec le recours à l'allaitement artificiel exclusif. C'est notamment le cas de l'âge gestationnel à la naissance (prématurité), avec un OR de 0,402, de la situation pondérale à la naissance (hypotrophie), avec un OR de 0,513, ainsi que des infections respiratoires aiguës du nourrisson ($p = 0,332$). Ces résultats concordent avec les observations de *Bekhtaoui Assia* et de *Kadi et al. (2017, Algérie)*, qui ont conclu que les facteurs médicaux précoces n'exercent pas une influence déterminante sur le choix du mode d'allaitement [178,192].

L'étude a montré que le lieu de résidence urbain/rural ($p = 0,051$) est proche de la signification, mais n'atteint pas le seuil statistique de 0,05. Cette tendance rejoint les résultats de *Zehnati et Sidi-Yakhlef (2024, Algérie)*, qui rapportent une plus grande persistance de l'allaitement en milieu rural (OR = 1,29) [132]. Cette hypothèse est également soutenue par les travaux de *Fischer et Olson (2014, Etats-Unis)*, qui montrent que dans les environnements urbains et favorisés, le lait artificiel peut être perçu comme un produit moderne ou valorisant socialement, influençant ainsi les choix des mères [193].

3.2. Pratiques alimentaires : usages, dérives et risques sanitaires

La marque Nursie®, en particulier la gamme Nursie Confort®, choisie par 46,7 % des mères, domine le marché. Cette tendance pourrait s'expliquer par sa grande disponibilité sur le marché et son prix compétitif. Cependant, le recours précoce à des formules "confort" sans justification médicale évoque une banalisation de l'usage des formules dites « de confort », dont l'emploi est normalement réservé aux nourrissons qui présentent des troubles digestifs clairement identifiés.

La quantité et fréquence des biberons varient largement selon l'âge du nourrisson. L'étude de *Malek et al. (2020, Australie-Nouvelle-Zélande)* montre que les parents adaptent souvent les instructions figurant sur les emballages à leur convenance [194]. Dans notre population, une fréquence de plus de 10 biberons/jour reste marginale (8,3 %), mais reflète des pratiques parfois éloignées des recommandations pédiatriques.

L'utilisation du lait de vache chez les nourrissons de moins de six mois reste marginale (1,14 %), mais sa présence, même chez des bébés de trois mois, soulève de sérieuses préoccupations sanitaires. Inadapté aux besoins nutritionnels des nourrissons, le lait de vache pur peut entraîner des risques graves, notamment des carences, des troubles digestifs et rénaux [195]. Cette pratique, bien que rare, est surtout observée dans des zones défavorisées, où le coût élevé des laits infantiles pousse certaines familles à y recourir par contrainte économique.

Concernant l'eau utilisée, la majorité des mères préfèrent l'eau en bouteille (89,74 %), ce qui témoigne ainsi d'une préférence pour une source perçue comme plus sûre. Toutefois, l'usage de l'eau du robinet (7,62 %), dans un contexte local marqué par la contamination des barrages (Cheffia, Mexa), comme le rappellent *Nasri et al. (2017)* et *Amrani (2020)*, expose les nourrissons à des cyanotoxines, notamment les microcystines-LR, connues pour leur hépatotoxicité [196,197].

L'analyse des résultats concernant le choix de l'eau en bouteille révèle que plus de la moitié des mères (55,09 %) utilisent indifféremment différentes marques d'eau en bouteille, tandis que d'autres privilégient certaines marques spécifiques, notamment Besbessa (21,07 %), Ifri (7,61 %) et Ain Bouglez (6,91 %). Cette diversité dans le choix de l'eau utilisée pour la reconstitution des biberons peut s'expliquer par plusieurs facteurs ; à titre d'exemple l'accessibilité, la disponibilité et la perception de la qualité.

La réutilisation des biberons après 2 heures par près de 24 % des mères expose aussi les nourrissons à un risque bactérien. Ces pratiques sont incompatibles avec les standards d'hygiène infantile recommandés par l'OMS et les sociétés de pédiatrie [137].

L'usage presque exclusif de la casserole (98,06 %), notamment en aluminium (57,66 %), soulève la question de la migration de l'aluminium dans l'eau chauffée. La forte prévalence des casseroles en aluminium s'explique par leur prix plus abordable comparé à l'inox, leur large disponibilité sur le marché et la transmission des habitudes d'utilisation de mère en fille, selon le témoignage de certaines mamans. Les autres méthodes de chauffage, telles que le chauffe-

biberon (1,14 %) et le micro-ondes (0,8 %), sont beaucoup moins fréquentes. Ces observations contrastent avec celles de *Marion Hulin et al. (2019, France)*, où le four à micro-ondes est le mode de chauffage le plus utilisé, avec près de 80 % des répondantes [198]. *Dominique Camus et al. (2023)* soulignent l'importance de sensibiliser les parents aux bonnes pratiques permettant de limiter l'exposition des nourrissons aux contaminants environnementaux. En effet, 51% des sage-femmes déconseillent cette méthode, en raison du risque de réchauffement inégal (hot-spots) [199,200].

3.3. Diversification alimentaire, santé néonatale et couverture vaccinale

La diversification est entamée avant 6 mois chez 67 % des mères, avec un âge moyen de 5,07 mois. Ces données sont proches de celles de *Laadjel et Taleb (2020, Est algérien)* [201], et de *Lemarchand (2018, France)* [189], mais inférieures aux recommandations internationales [195].

La diversité des pratiques en Algérie est confirmée par *Rovillé-Sausse et al.* qui rapportent un début entre 3 et 4 mois, et par *Bournez (2017)* en France (4 à 6 mois) [202]. En revanche, les études de *Rochoy (2021)* [203] ou *Banti (2016)* [204] situent un âge médian de diversification plus tardif (9,5 mois), illustrant les divergences culturelles et les approches pédagogiques.

Du point de vue de la santé, la majorité des nourrissons ne présentent aucun antécédent médical (91,65 %). Les pathologies respiratoires restent les plus fréquentes, ce qui rejoint les observations de *Deschanvres et al. (2017, France)* [205].

La couverture vaccinale atteint 77 %, en deçà de l'objectif national (86 %, *MICS 2012-2013*) [206], mais supérieure à celle observée en France (46 %, *Deschanvres, 2017*), témoignant d'un suivi pédiatrique relativement satisfaisant, mais à renforcer [205].

4. Conclusion

Ce chapitre révèle une prédominance de l'allaitement artificiel dans la wilaya d'Annaba, influencée par des facteurs professionnels, culturels, et économiques, dans un contexte où les recommandations internationales sont encore partiellement suivies. En comparaison avec les données nationales et internationales, nos résultats se situent entre des pratiques plus favorables observées dans certains pays et des difficultés similaires rencontrées ailleurs en Afrique ou en Europe.

La diversification alimentaire précoce, la réutilisation des biberons, l'utilisation d'eau potentiellement contaminée ou de casseroles en aluminium soulignent des pratiques à risque, révélatrices de besoins d'information, de soutien et d'encadrement.

Les déterminants statistiquement significatifs identifiés (niveau d'études, antécédents d'allaitement, mode d'accouchement) doivent guider la mise en œuvre de stratégies ciblées, qui intègrent : un accompagnement prénatal, un suivi postnatal, et des politiques d'accessibilité aux produits sûrs.

L'ensemble de ces éléments plaide pour une politique de santé publique plus proactive, qui vise à protéger les nourrissons des risques évitables, à renforcer l'autonomie décisionnelle des mères par l'information, et à promouvoir un environnement favorable à l'allaitement maternel, notamment en milieu urbain et professionnel.

CHAPITRE II

**Évaluation de l'aluminium, des
contaminants métalliques et des
minéraux nutritionnels dans les
préparations pour nourrissons et le
lait maternel**

1. Matériels et méthodes

1.1. Type de l'étude

La présente étude s'inscrit dans une démarche analytique descriptive, de nature quantitative et à caractère transversal. Elle a pour objectif principal la quantification précise de l'aluminium, ainsi que d'autres métaux, dans les préparations infantiles pour nourrissons (PPN), en parallèle à l'analyse d'échantillons de lait maternel prélevés localement.

1.2. Matériel de laboratoire

1.2.1. Verrerie

La verrerie de laboratoire utilisée pour les travaux expérimentaux comprend principalement des fioles jaugées, des béchers, des pipettes graduées, des verres de montre et des éprouvettes.

1.2.2. Equipements

Les analyses ont été réalisées à l'aide des équipements suivants :

- Spectromètre iCE 3000 (Thermo Fisher Scientific ®)
- Balance analytique de précision (Adam Equipement ® 0,0001g) ;
- Etuve (Mettler ®) ;
- Dessiccateur ;
- Hotte ;
- Plaque chauffante & agitateur magnétique (IKA® RH basic 2).

1.2.3. Réactifs

Les réactifs utilisés pour la préparation et la digestion des échantillons incluent :

- Acide nitrique concentré (69 %, Merck Emsure®) ;
- Acide perchlorique (Biochem Chemopharma®).
- Eau purifiée à conductivité inférieure à 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Bioseptique®).

1.2.4. Autres consommables

L'étude a nécessité l'utilisation de consommables de laboratoire tels que des flacons en plastique, des tubes de prélèvement, ainsi que du papier filtre (Whatman n°24).

1.3. Types d'échantillons analysés

1.3.1. Préparations pour nourrissons (PPN)

Cette étude a porté sur les formules infantiles commercialisées en libre accès aux parents. La collecte des échantillons s'est effectuée entre février et mai 2023, dans divers circuits de distribution incluant les grandes et moyennes surfaces, les magasins spécialisés en puériculture,

les parapharmacies et les pharmacies. Le choix a été orienté en priorité vers les enseignes disposant d'une large variété de produits, notamment les grandes surfaces et les magasins de puériculture, devenus les lieux d'approvisionnement privilégiés des parents. A l'inverse, les pharmacies et parapharmacies ne proposent qu'un éventail restreint de références.

Au total, 61 boîtes de préparations destinées aux nourrissons de moins de 12 mois, d'un poids unitaire de 500 g, ont été échantillonnées. Ces échantillons couvraient différentes catégories de formules :

- Laits pour prématurés ;
- Laits 1^{er} âge ;
- Laits de suite (2^{ème} âge) ;
- Laits infantiles spécifiques (anti-colique, anti-régurgitation, anti-diarrhéique, sans lactose, hypoallergéniques, à base de soja ou de riz).

1.3.1.1. Procédure d'échantillonnage

L'échantillonnage des boîtes de lait infantile a été conduit selon une méthode aléatoire systématique, conforme aux lignes directrices de la norme CAC/GL 50-2004, assurant ainsi la représentativité de l'échantillon [207]. La procédure s'est déroulée en plusieurs étapes :

- **Numérotation des unités**

Dans chaque point de vente, toutes les boîtes d'une même marque ont été comptabilisées, puis numérotées de manière séquentielle (de 1 à N) sur un schéma de repérage. Lorsque le nombre de boîtes était réduit, la numérotation a été réalisée mentalement.

- **Détermination de la taille de l'échantillon (n)**

La taille de l'échantillon a été déterminée à l'aide du tableau de plans d'échantillonnage par attributs de la norme ISO 2859-1, en fonction du nombre total d'unités disponibles N [208]. Par exemple, pour un lot de 14 boîtes, 3 échantillons ont été sélectionnés.

- **Calcul de l'intervalle d'échantillonnage (k)**

L'intervalle d'échantillonnage (k) a été obtenu à partir de la formule suivante :

$$k = \frac{N}{n}$$

Où :

N est le nombre total de boîtes dans la population,

n est la taille de l'échantillon.

Ainsi, pour $N = 14$ et $n = 3$, on obtient $k \approx 5$.

- **Sélection du point de départ aléatoire**

Un nombre aléatoire j compris entre 1 et k a été tiré au sort pour désigner la première unité. Par exemple, si $j = 3$, la première boîte sélectionnée portait le numéro 3.

- **Sélection des unités suivantes**

A partir de la première unité (numérotée 3), les autres unités ont été sélectionnées à intervalles réguliers de k . Les boîtes de lait sélectionnées pour constituer l'échantillon sont celles correspondant aux positions suivantes : $j, j + k, j + 2k, \dots, j + (n-1)k$. Dans notre exemple, les boîtes choisies sont celles dont les numéros sont 3, 8, et 13 ($3, 3+5, 3 + 2 \times 5$) (cf. Figure 30).

Cette méthode permet une sélection représentative et partiellement aléatoire des produits disponibles sur le marché.



Figure 30. Illustration de la numérotation et de la sélection systématique des boîtes de lait infantile sur un niveau de stockage.

Remarques particulières

Durant la période de l'étude, les restrictions à l'importation imposées par le Ministère du Commerce ont fortement limité la disponibilité des formules spéciales. Par conséquent, certains types de laits étaient en rupture ou vendus à l'unité sur autorisation spéciale de la Direction du Commerce de la Wilaya d'Annaba. Seules les boîtes intactes ont été incluses dans l'analyse.

1.3.1.2. Transport et conservation

Les boîtes prélevées ont été transportées au laboratoire d'Hydrologie-Bromatologie de la Faculté de Médecine d'Annaba, où elles ont été étiquetées, enregistrées, puis conservées dans leur emballage d'origine, à l'abri de l'humidité, jusqu'à leur traitement analytique.

1.3.2. Lait maternel

1.3.2.1. Nombre d'échantillons

L'analyse des teneurs en aluminium a été effectuée sur 12 échantillons de lait maternel. Bien que les directives relatives aux plans d'échantillonnage pour les contaminants dans le lait humain n'indiquent pas un nombre minimal strict, les recommandations générales pour les études à l'échelle nationale préconisent un seuil de 50 échantillons pour les pays de moins de 50 millions d'habitants. Toutefois, ce seuil peut être adapté selon la nature et les objectifs de l'étude comme la taille de la population et les niveaux de contaminants à mesurer [209,210].

Dans le cadre de ce travail, axé sur une comparaison entre lait maternel et lait infantile 1^{er} âge dans la région d'Annaba, un échantillon de 12 unités a été jugé suffisant pour une évaluation préliminaire. Ce nombre, bien que restreint, permet une première estimation des teneurs en métaux d'intérêt et de leur variabilité locale.

1.3.2.2. Sélection des participantes et critères d'inclusion

Les prélèvements ont eu lieu en avril 2023 auprès de mères allaitantes, résidant à Annaba depuis au moins trois ans et fréquentant trois centres de vaccination sélectionnés par tirage au sort. La participation était volontaire, après obtention d'un consentement oral éclairé, précédé d'une explication détaillée des objectifs et des modalités de l'étude.

Critères d'inclusion :

- Etre en bonne santé ;
- Avoir eu une grossesse normale sans complications ;
- Avoir accouché d'un nourrisson à terme sans incident médical ;
- Allaiter un enfant âgé de six mois ou moins ;
- Être disponible et consentante pour le prélèvement.

Les mères ayant consommé des compléments en oligo-éléments, suivi un traitement médicamenteux ou étant fumeuses ont été exclues.

1.3.2.3. Procédure de collecte des échantillons

Les échantillons ont été recueillis dans des tubes en polypropylène préalablement décontaminés (trempage une nuit dans une solution d'acide nitrique à 10 %, rinçage à l'eau purifiée, séchage). Afin d'assurer la représentativité de l'échantillon et de limiter la variabilité des concentrations en métaux, un protocole rigoureux a été suivi [213] :

- 10 mL de lait ont été recueillis manuellement et répartis en trois fractions :
 - Un tiers en début de tétée (lait de début),
 - Un tiers en milieu de tétée,
 - Un tiers en fin de tétée (lait de fin).
- Avant chaque prélèvement, les mains, les aréoles et les mamelons ont été nettoyés à l'eau distillée déionisée ultrapure.
- Les échantillons ont été prélevés au sein même des structures sanitaires, dans un espace dédié garantissant confort et intimité.

1.3.2.4. Transport et conservation des échantillons

Les échantillons, étiquetés et accompagnés de fiches de renseignement, ont été maintenus à +4 °C durant le transport vers le laboratoire d'Hydrologie-Bromatologie. Ils y ont été conservés au réfrigérateur à la même température, puis minéralisés dans un délai de 24 heures après le prélèvement.

1.4. Méthodes

1.4.1. Digestion des échantillons de lait

1.4.1.1. Mesures de précaution pour minimiser la contamination

Afin de limiter au maximum les risques de contamination externe durant la préparation et la manipulation des échantillons, les précautions suivantes ont été rigoureusement observées :

- Le port de gants en polyéthylène préalablement lavés avec un détergent liquide a été systématique tout au long des manipulations.
- Les mouvements corporels au-dessus des récipients ouverts ont été évités afin de prévenir l'introduction de poussières ou de particules dans les échantillons.

1.4.1.2. Préparation du matériel

Avant leur utilisation, l'ensemble du matériel de verrerie (bêchers, pipettes, éprouvettes, verres de montre, fioles jaugées, entonnoirs, flacons, etc.) a été soumis à un protocole de nettoyage strict :

- Lavage initial au détergent, suivi d'un rinçage à l'eau du robinet.
- Trempage dans une solution d'acide nitrique à 10 % pendant une durée minimale de 12 heures.
- Rinçage abondant à l'eau ultrapure.
- Séchage dans une étuve pendant 90 minutes, puis refroidissement à température ambiante avant utilisation.

1.4.1.3. Préparation des échantillons

Pour les préparations infantiles en poudre, la procédure a été la suivante :

- Ouverture de la boîte et homogénéisation du contenu.
- Pesée de 2 g de poudre dans un bécher propre.
- Ajout de 20 mL d'acide nitrique concentré (65 %) et de 10 mL d'acide perchlorique (70 %).
- Couverture du bécher à l'aide d'un verre de montre.
- Repos à température ambiante pendant une nuit pour permettre une pré-digestion chimique lente.

1.4.1.4. Digestion des échantillons

La digestion proprement dite a été réalisée de la manière suivante :

- Chauffage du bécher sur une plaque chauffante à une température comprise entre 150 et 160 °C.
- La digestion a été considérée complète lorsque les fumées brunes ont disparu au profit de fumées blanches caractéristiques de l'acide perchlorique. Cette opération a été effectuée sous une hotte ventilée afin d'éviter toute exposition aux vapeurs toxiques (cf. figure 31).
- Si nécessaire, un nouveau mélange acide (acide nitrique/acide perchlorique, 2:1) a été ajouté jusqu'à apparition des fumées blanches signalant la fin de la digestion.

1.4.1.5. Post-digestion et filtration

- Après refroidissement du mélange, un volume d'environ 30 mL d'eau ultrapure a été ajouté.
- La solution a ensuite été filtrée à l'aide d'un papier filtre Whatman n°42 dans une fiole jaugée.
- Le volume final a été complété à 50 mL avec de l'eau ultrapure [10,211–213].

1.4.1.6. Conservation des échantillons

Les extraits digérés ont été transférés dans des flacons en polyéthylène étiquetés, puis conservés à une température de +4 °C jusqu'à leur analyse. Le délai maximal entre la digestion et l'analyse n'a pas excédé 20 jours.

1.4.1.7. Blanc analytique

Un échantillon blanc a été préparé dans les mêmes conditions que les échantillons de lait, à l'exception de l'introduction de 2 mL d'eau désionisée ultrapure à la place de l'échantillon, afin de contrôler l'absence de contamination liée aux réactifs ou au matériel.

1.4.1.8. Digestion des échantillons de lait maternel

La même procédure a été appliquée pour les échantillons de lait maternel. Toutefois, la quantité initiale a été ajustée à 3 mL de lait, introduits dans le bécher après homogénéisation par agitation douce, conformément aux recommandations méthodologiques [214].

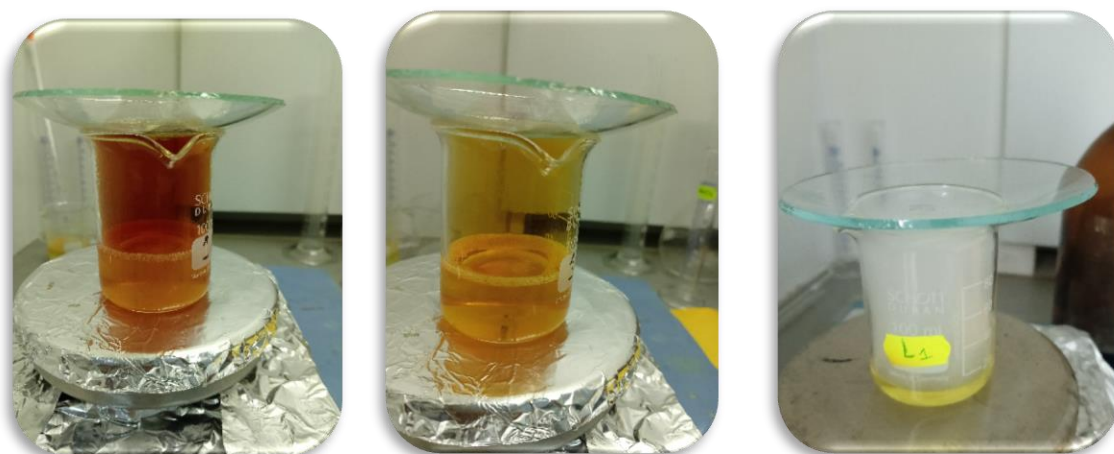


Figure 31. Etapes de la digestion réalisée au laboratoire d'Hydrologie-Bromatologie (réalisée).

1.4.2. Dosage de l'aluminium et des autres métaux

1.4.2.1. Transport et conditions d'analyse

Les flacons contenant les échantillons digérés ont été soigneusement conditionnés avant d'être acheminés au laboratoire des sciences minérales de l'Office National de Recherche Géologique et Minière (ORGM), situé à Boumerdès. Aucun dispositif de conservation particulier n'a été requis pour le transport. Les analyses ont été réalisées par spectrométrie d'absorption atomique à flamme (SAA-F).

1.4.2.2. Présentation du laboratoire d'analyse (ORGM)

Le laboratoire des sciences minérales de l'ORGM, basé à Boumerdès, bénéficie d'une accréditation selon la norme internationale ISO/CEI 17025 :2017, délivrée par l'organisme national d'accréditation Algerac depuis le 6 janvier 2022. Cette certification, initialement valide pour trois ans et reconduite pour quatre années supplémentaires, atteste de la conformité du laboratoire aux exigences de compétence technique et de fiabilité des résultats d'essai [215].

Doté d'équipements analytiques de pointe, le laboratoire se spécialise dans la caractérisation minéralogique et la quantification des métaux, y compris les éléments traces. Il dispose également d'un hall pilote semi-industriel permettant le traitement des minerais et la conduite d'essais de faisabilité [216].

1.4.2.3. Détermination de l'aluminium (Al)

L'analyse de l'aluminium a été réalisée à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique iCE 3000 Series (Thermo Fisher Scientific), équipé d'un four graphite (atomiseur électrothermique) et d'un système de correction de fond Zeeman. La méthode d'analyse suivait les instructions du manuel de l'appareil et les spécifications de la norme 5009.268–2016 relative à la sécurité alimentaire et à la détermination de l'aluminium [217].

La lecture spectrale a été effectuée à une longueur d'onde de 309,3 nm, avec une bande passante de 0,5 nm. Les échantillons, dilués à une concentration finale de 1 % d'acide nitrique, ont été analysés après ajout de 50 µg de nitrate de magnésium comme modificateur chimique pour améliorer la sensibilité et limiter les interférences. L'appareil est doté d'un échantillonneur automatique et d'un affichage numérique de l'absorbance et de la concentration.

Les températures spécifiques pour le four graphite étaient fixées à 1500 °C pour l'incinération et à 2300 °C pour l'atomisation. L'argon servait de gaz inerte. Une courbe d'étalonnage a été générée à partir de solutions étalons contenant de l'aluminium, et les réponses obtenus pour les échantillons ont été comparés à cette courbe.

Les performances analytiques incluent :

- Masse caractéristique : 3,6 pg.
- Absorbance typique de 0,4 pour une concentration de 30 mg/L.
- Limite de quantification (LOQ) : 0,2 µg/L.

Chaque échantillon a été analysé en double, et la moyenne des valeurs a été retenue pour l'interprétation.

1.4.2.4. Dosage des métaux lourds toxiques

La détermination des concentrations en métaux toxiques (Pb, Hg, Ti, Ni, Cr) a été réalisée par spectrométrie d'absorption atomique, utilisant un four graphite pour les métaux lourds et une technique de génération de vapeur froide (CV-AAS) pour le mercure.

Le chrome a été étudié sous sa forme hexavalente Cr(VI), reconnue pour sa toxicité et sa cancérogénicité, contrairement au Cr(III), oligo-élément essentiel [218]. Le nickel, bien qu'occasionnellement mentionné comme trace nutritionnelle, a également été classé comme métal toxique en raison de ses effets allergènes, néphrotoxiques et cancérogènes potentiels [219].

Le protocole analytique est le suivant :

- Préparation de solutions étalons à partir de solutions mères (1000 mg/L) ;
- Ajout de modificateurs chimiques selon l'élément analysé.
- Aspiration automatique des standards par ordre croissant de concentration (20 µL) ;
- Génération de courbes d'étalonnage par le logiciel intégré ;
- Aspiration directe des échantillons et du blanc dans l'appareil.

Le Tableau 32 présente les conditions analytiques spécifiques utilisées pour la quantification des métaux lourds par spectrométrie d'absorption atomique.

Tableau 32. Paramètres analytiques pour la détection des métaux lourds toxiques par spectrométrie d'absorption atomique.

| Elément | Longueur d'onde (nm) | Flamme utilisée | Temp. incinération / atomisation (°C) | Modificateur chimique | LOQ (µg/L) |
|---------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|------------|
| Pb | 217 | Air/Acétylène | 800 / 1200 | 50 µg de nitrate d'ammonium | 0,7 |
| Hg | 253,7 | Génération vapeur froide | Température ambiante | 50 µg de dichromate d'ammonium | 6 |
| Ti | 365,4 | Oxyde nitreux/Acétylène | 1200 / 2600 | Aucun | 0,57 |
| Ni | 232 | Air/Acétylène | 1000 / 2300 | 50 µg de nitrate de magnésium | 0,5 |
| Cr(VI) | 357,9 | Oxyde nitreux/Acétylène | 1000 / 2200 | 50 µg de nitrate de magnésium | 0,5 |

- **Dosage du mercure (Hg)**

Le mercure a été quantifié par génération de vapeur froide après réaction avec une solution de borohydrure de sodium (NaBH_4) (0,5–1,0 % m/V) en présence d'acide chlorhydrique (5 % v/v). Le mercure élémentaire volatilisé a été transporté par un flux d'argon (50 à 150 mL/min) dans une cellule d'absorption. Les lectures ont été prises à 253,7 nm, avec une LOQ de 6 µg/L. Des échantillons blancs ainsi que des matériaux de référence certifiés ont été inclus dans chaque série pour garantir la validité des résultats.

1.4.2.5. Détermination des minéraux essentiels

L'analyse des éléments minéraux essentiels (Mg, Fe, Zn, Na, K, Cu, Mn) a été réalisée par spectrométrie d'émission atomique (SEA) conformément à la norme GB 5413.21-2010, relative à la détermination des teneurs en éléments minéraux dans les aliments pour nourrissons, jeunes enfants, lait cru et produits laitiers [220].

Le protocole expérimental général est le suivant :

- Préparation de séries d'étalons à partir de solutions mères (1 g/L ou 0,1 g/L) ;
- Ajout de modificateurs chimiques si nécessaire (ex. : 2 mL de solution de lanthane à 50 g/L pour le magnésium) ;
- Aspiration automatique des standards (20 µL) ;
- Etablissement de courbes d'étalonnage (absorbance vs concentration) ;
- Aspiration directe des échantillons et blancs.

Le Tableau 33 présente les conditions analytiques spécifiques utilisées pour la détermination des éléments minéraux essentiels par spectrométrie d'émission atomique.

Tableau 33. Paramètres analytiques pour la détermination des minéraux essentiels par spectrométrie d'émission atomique.

| Elément | Longueur d'onde (nm) | Flamme utilisée | Temps d'intégration | LOQ (mg/L) |
|-----------|----------------------|-------------------------------|---------------------|------------|
| Mg | 285,2 | Air/Acétylène (2/17 L/min) | 3 s | 0,2400 |
| Fe | 248,3 | Air/Acétylène (2/17 L/min) | 3 s | 0,0900 |
| Zn | 213,9 | Air/Acétylène (2/17 L/min) | 3 s | 0,0100 |
| Na | 589,0 | Air/Acétylène (2/17 L/min) | 3 s | 0,0400 |
| K | 766,5 | Air/Acétylène (2/17 L/min) | 3 s | 0,0800 |
| Cu | 324,8 | Air/Acétylène (2/17 L/min) | 3 s | 0,0330 |
| Mn | 279,5 | Air/Acétylène (2/17 L/min) | 3 s | 0,0002 |

1.5. Critères d'évaluation et analyse des données

1.5.1. Conversion des unités

Les résultats des analyses portant sur les échantillons de lait maternel ont initialement été exprimés en mg/L. Afin de faciliter leur comparaison avec les données relatives aux laits infantiles en poudre ainsi qu'avec les valeurs issues d'autres études, ces concentrations ont été converties en µg/g, en tenant compte de la masse volumique moyenne du lait maternel, estimée à 1031 g/L [221], selon la formule suivante :

$$\text{Concentration en } \mu\text{g/g} = \frac{\text{Concentration en } \mu\text{g/L}}{\text{masse volumique moyenne du lait maternel en g/L}}$$

Par ailleurs, pour permettre une évaluation harmonisée vis-à-vis des normes nutritionnelles nationales et internationales, généralement exprimées en µg/100 kcal ou mg/100 kcal, une conversion énergétique a été effectuée.

Cette conversion repose sur la densité calorique du lait maternel, estimée à 66 kcal/100 mL, ainsi que sur les valeurs énergétiques affichées sur les emballages des préparations infantiles analysées [222].

La conversion des concentrations en $\mu\text{g}/100 \text{ kcal}$ a été effectuée selon la formule suivante :

$$\text{Concentration en } \mu\text{g}/100 \text{ kcal} = \frac{\text{Concentration en } \mu\text{g/g} \times 100}{\text{Densité calorique (kcal/mL)}}$$

1.5.2. Evaluation des teneurs en aluminium

L'arrêté interministériel du 23 février 2012 (Aouel Rabie Ethani 1433), fixant les critères de composition et de qualité des préparations pour nourrissons, ne spécifie aucun seuil réglementaire pour l'aluminium [121]. En conséquence, les résultats ont été comparés à deux référentiels internationaux :

- **Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) :** 1 mg/kg de poids corporel/semaine (EFSA, 2008)
- **Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire (DHTP) :** 2 mg/kg/semaine (JECFA, 2011) [7,115].

L'évaluation de l'exposition infantile à l'aluminium a suivi une méthodologie en plusieurs étapes :

- Estimation de la quantité d'aluminium par cuillère à ras de poudre de lait infantile, afin d'évaluer la teneur totale par biberon ;
- Calcul de la dose quotidienne d'aluminium ingérée en fonction du nombre de biberons/jour, en se basant sur les recommandations nutritionnelles des associations pédiatriques internationales et les indications figurant sur les étiquetages ;
- Détermination de la Dose Hebdomadaire Ingérée (DHI) par kg de poids corporel.

Les données de référence utilisées sont synthétisées dans les tableaux suivants :

Tableau 34. Recommandations sur la préparation et la fréquence des biberons selon l'âge du nourrisson [124,223]

| Age du nourrisson | Cuillères/biberon | Biberons/jour | Volume/biberon (mL) |
|------------------------------------|-------------------|---------------|---------------------|
| De la naissance à 1 semaine | 1 à 2 | 7 | 30 à 60 |
| Jusqu'à 1 mois | 3 | 6 | 90 |
| 2 mois | 4 | 6 | 120 |
| 3 mois | 5 | 6 | 150 |
| 4 mois | 6 | 5 | 180 |
| De 5 à 6 mois | 7 | 4 | 210 |
| De 7 à 12 mois | 7 | 3 | 210 |

Tableau 35. Quantité moyenne de lait maternel consommée par jour selon l'âge du nourrisson [124,224]

| Age | Quantité moyenne par jour (ml) |
|-----------------------|--------------------------------|
| Naissance à 1 semaine | 400 |
| Naissance à 1 semaine | 600 |
| Jusqu'à 2 mois | 700 |
| De 2 à 3 mois | 800 |
| De 4 à 6 mois | 1000 |
| De 7 à 12 mois | 850 |

Tableau 36. Poids moyen des nourrissons selon l'âge et le sexe [137,225–227]

| Age | Poids moyen du bébé garçon (Kg) | Poids moyen du bébé fille (Kg) |
|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Naissance à 1 semaine | 3,5 | 3,3 |
| 1 mois | 4,5 | 4,2 |
| 2 mois | 5,6 | 5,1 |
| 3 mois | 6,4 | 5,8 |
| 4 mois | 7,0 | 6,4 |
| 5 mois | 7,5 | 6,9 |
| 6 mois | 7,9 | 7,3 |
| 7 mois | 8,3 | 7,6 |
| 8 mois | 8,6 | 7,9 |
| 9 mois | 8,9 | 8,2 |
| 10 mois | 9,2 | 8,5 |
| 11 mois | 9,4 | 8,7 |
| 12 mois | 9,6 | 8,9 |

Par ailleurs, une analyse comparative des teneurs en aluminium entre marques, gammes de produits (1^{er} âge, 2^{ème} âge, formules spécifiques), et types de préparations a été conduite afin de détecter d'éventuelles disparités.

1.5.3. Comparaison des teneurs en métaux toxiques et minéraux essentiels

Les concentrations mesurées ont été confrontées aux normes définies par la réglementation algérienne et la législation européenne (Tableaux 37 à 41).

Tableau 37. Normes algériennes relatives aux métaux dans les préparations pour nourrissons [121].

| Elément | Unité | Minimum | Maximum | LIM* |
|------------------|-------------|---------|---------|------|
| Plomb | mg/kg | - | - | 0,02 |
| Cuivre | µg/100 kcal | 35 | - | 120 |
| Zinc | mg/100 kcal | 0,5 | - | 1,5 |
| Fer | mg/100 kcal | 0,45 | - | - |
| Magnésium | mg/100 kcal | 5 | - | 15 |
| Sodium | mg/100 kcal | 20 | 60 | - |
| Potassium | mg/100 kcal | 60 | 180 | - |
| Manganèse | µg/100 kcal | 1 | - | 100 |

*LIM : Limite indicative maximale

Concernant le mercure, aucune limite n'est spécifiée dans la réglementation algérienne. De même, la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis a établi des niveaux d'action pour le mercure dans divers aliments, mais n'a pas défini de seuil pour les préparations pour nourrissons [228].

En l'absence de référentiel national, les dispositions du règlement (CE) n° 1831/2003 ont été appliquées. Celui-ci fixe la teneur maximale autorisée en mercure dans les préparations pour nourrissons à 0,01 mg/kg [229].

A ce jour, aucune norme nationale ou internationale ne précise de seuils pour le chrome, le nickel ou le titane dans les préparations pour nourrissons.

- **Législation européenne**

Tableau 38. Normes européenne relatives aux préparations pour nourrissons à base de protéines ou d'hydrolysats de protéines de lait de vache ou de lait de chèvre [230].

| Elément | Unité | Minimum | Maximum |
|------------------|-------------|---------|---------|
| Cuivre | µg/100 kcal | 60 | 100 |
| Zinc | mg/100 kcal | 0,5 | 1,5 |
| Fer | mg/100 kcal | 0,3 | 1,3 |
| Magnésium | mg/100 kcal | 5 | 15 |
| Sodium | mg/100 kcal | 25 | 60 |
| Potassium | mg/100 kcal | 80 | 160 |
| Manganèse | µg/100 kcal | 1 | 100 |

Pour les préparations pour nourrissons à base d'isolats de protéines de soja, qu'elles soient seules ou mélangées avec des protéines de lait, ainsi que pour les laits de suite et les préparations de suite à base d'isolats de protéines de soja (seuls ou associés à des protéines de lait de vache ou de chèvre), toutes les normes mentionnées dans le tableau précédent s'appliquent, à l'exception de celles relatives au fer et au zinc, qui sont remplacées par les valeurs suivantes :

Tableau 39. Normes pour les préparations pour nourrissons à base d'isolats de protéines de soja, seuls ou mélangés avec des protéines de lait [230].

| Elément | Unité | Minimum | Maximum |
|-------------|-------------|---------|---------|
| Zinc | mg/100 kcal | 0,75 | 1,25 |
| Fer | mg/100 kcal | 0,45 | 2 |

Tableau 40. Normes pour les préparations de suite à base de protéines de lait de vache ou de chèvre [230].

| Elément | Unité | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|---------|---------|
| Fer | mg/100 kcal | 0,6 | 2 |

Tableau 41. Normes pour les préparations de suite à base d'isolats de protéines de soja [230].

| Elément | Unité | Minimum | Maximum |
|-------------|-------------|---------|---------|
| Zinc | mg/100 kcal | 0,75 | 1,25 |
| Fer | mg/100 kcal | 0,9 | 2,5 |

1.6. Analyse statistique

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel SPSS® version 27, tandis que le logiciel Excel 2021 a été utilisé pour le traitement initial des données et le calcul des statistiques descriptives. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes, écarts-types, valeurs minimales et valeurs maximales.

1.6.1. Vérification de la normalité des données

Avant toute analyse comparative, la distribution des variables a été examinée à l'aide des tests de Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk, permettant de déterminer si les données suivaient une loi normale.

1.6.2. Tests appliqués en fonction des conditions statistiques

Afin de choisir les tests statistiques appropriés pour l'analyse des données, la normalité des distributions et l'homogénéité des variances ont été systématiquement évaluées. Le tableau suivant résume les tests appliqués selon les conditions de validité observées.

Tableau 42. Tests statistiques selon la normalité et l'homogénéité des variances.

| Type de distribution | Homogénéité des variances | Test statistique utilisé |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|
| Normale | Oui | Analyse de variance (ANOVA) |
| Normale | Non | Test de Welch (alternative à l'ANOVA classique) |
| Non normale | - | Test de Kruskal-Wallis (comparaisons multiples) |
| Non normale (2 groupes) | - | Test de Mann-Whitney |

1.6.3. Comparaisons post-hoc

Lorsque des différences significatives ont été détectées entre groupes, des comparaisons post-hoc adaptées ont été réalisées afin d'identifier précisément les groupes présentant des écarts significatifs. Le tableau 43 présente les tests post-hoc utilisés en fonction de la situation statistique.

Tableau 43. Tests post-hoc selon la situation statistique.

| Situation | Test post-hoc appliqué |
|-----------------------------|----------------------------------------------------|
| Variances homogènes (ANOVA) | Test de Tukey (non précisé, à ajouter si concerné) |
| Variances inégales (Welch) | Test de Games-Howell |
| Données non paramétriques | Test de Dunn-Bonferroni |

1.6.4. Seuil de signification

Le seuil de significativité statistique a été fixé à une valeur de $p < 0,05$.

Toute valeur de p inférieure à ce seuil a été considérée comme statistiquement significative.

2. Résultats

2.1. Propriétés et caractéristiques des échantillons analysés

2.1.1. Identification et origine des formules infantiles analysées

L'analyse a porté sur 61 préparations destinées à l'alimentation des nourrissons de moins de 12 mois, collectées auprès de différents points de vente. La figure suivante présente la répartition géographique des pays de fabrication de ces produits.

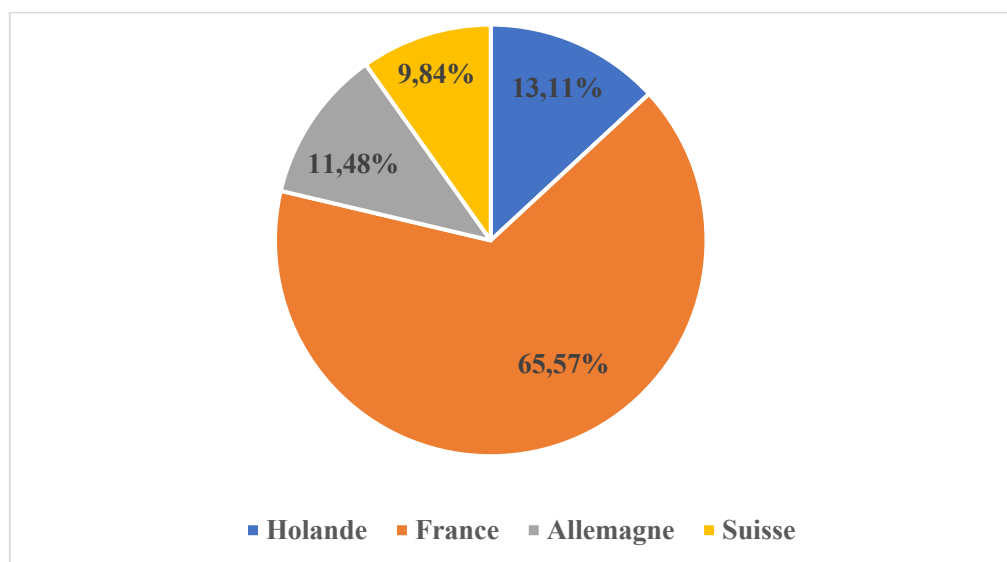


Figure 32. Répartition des laits infantiles par pays de fabrication (n = 61).

Une majorité des échantillons (65,57 %) provient de France, suivie par la Hollande (13,11 %), l'Allemagne (11,48 %) et la Suisse (9,84 %).

La répartition selon les fabricants est détaillée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 44. Répartition des préparations infantiles par fabricant.

| Fabricant | Pourcentage (%) |
|------------------|-----------------|
| Nestlé | 13,11 |
| Blédina | 19,67 |
| Celia | 11,48 |
| Fasska | 18,03 |
| Regilait | 13,11 |
| Nutricia | 1,64 |
| UP International | 11,48 |
| Hochdorf Swiss | 9,84 |
| Sodilac | 1,64 |
| Total | 100 |

Fasska est le fabricant le plus représenté dans l'échantillon, avec 18,03 % des préparations analysées. Il est suivi de Blédina, qui occupe la deuxième place avec 19,67 %, soit la part la plus élevée. Nestlé et Regilait arrivent ensuite, à égalité, avec 13,11 % chacun. Celia et UP International représentent également des parts notables avec environ 11 %. En revanche, Nutricia et Sodilac sont les moins représentées, avec seulement 1,64 % des produits analysés.

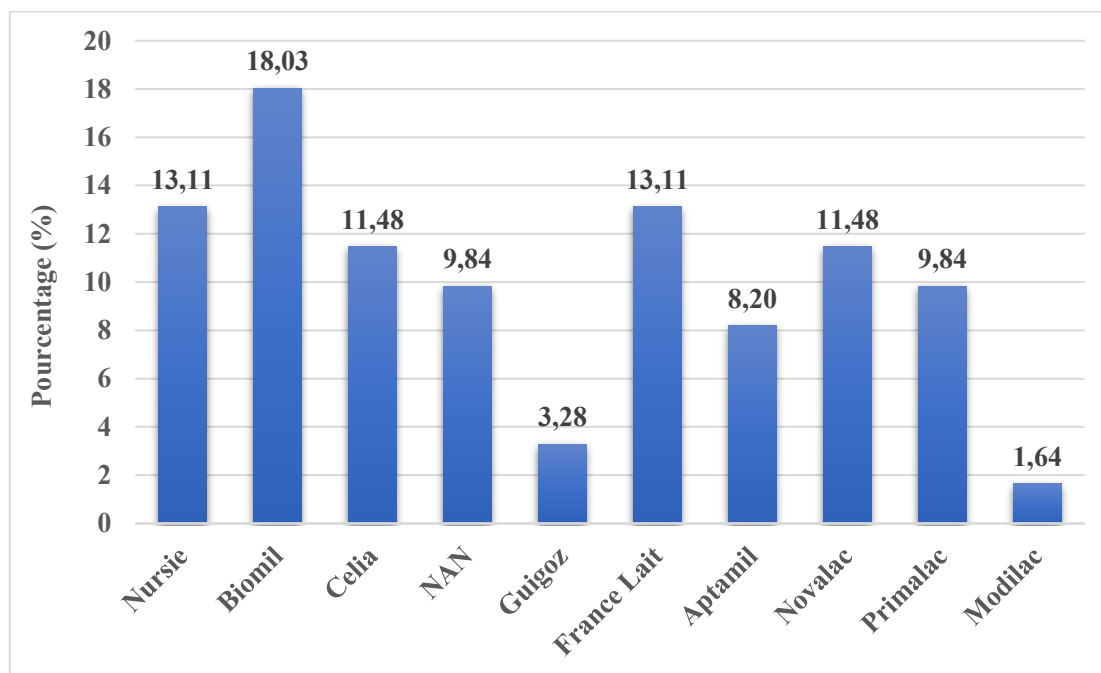


Figure 33. Répartition des préparations infantiles selon la marque.

La marque Biomil® est la plus fréquente dans l'échantillon analysé (18,03 %), suivie de Nursie® et France Lait® (13,11 % chacune). Les marques Celia® et Novalac® représentent chacune 11,48 %, tandis que NAN® et Primalac® apparaissent à 9,84 %. Les marques Guigoz® (3,28 %) et Modilac® (1,64 %) sont les moins représentées (Figure 33).

2.1.2. Classification des préparations pour nourrissons

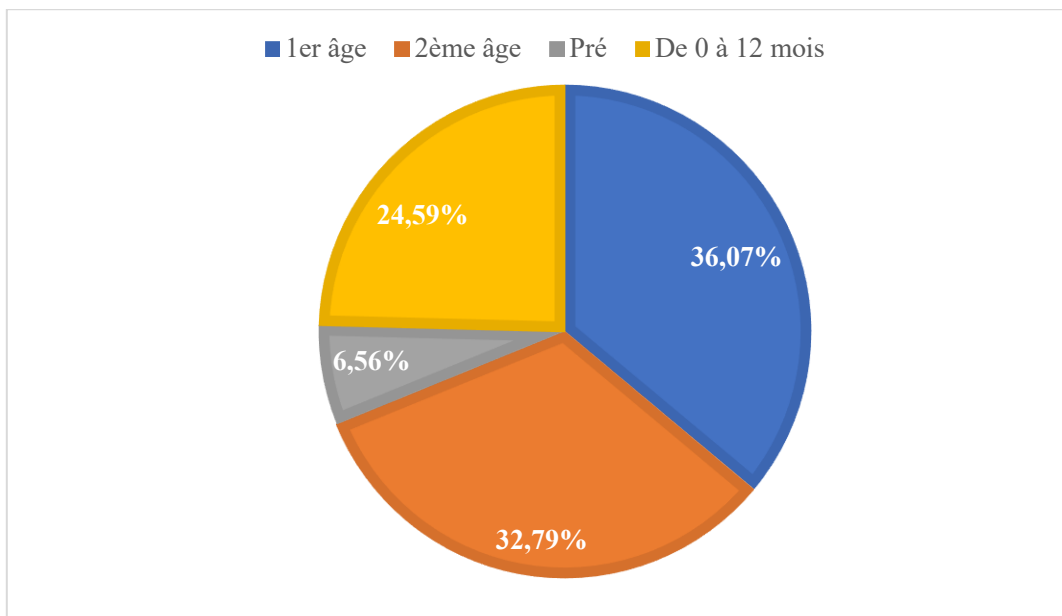


Figure 34. Répartition des laits infantiles selon le stade d'utilisation.

Les préparations infantiles ont été classées selon leur stade d'utilisation (Figure 34) :

- **Laits 1^{er} âge** : 36,07 % ; destinés aux nourrissons dès la naissance ;
- **Laits 2^{ème} âge** : 32,79 % ; adaptés aux besoins nutritionnels à partir de 6 mois ;
- **Laits pour prématurés** : 6,56 % ; destinés aux nouveau-nés prématurés ou de faible poids de naissance ;
- **Formules 0-12 mois spécifiques** : 24,59 % — couvrant des besoins particuliers (formules thérapeutiques, complètes, etc.).

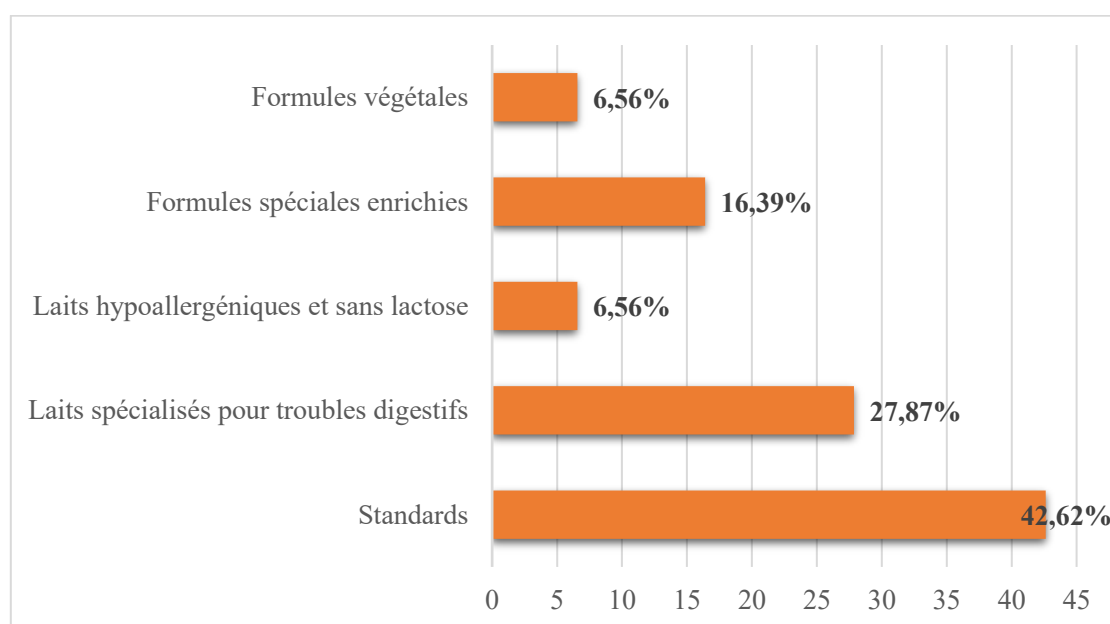


Figure 35. Répartition des laits infantiles selon leur classification nutritionnelle.

Selon leur classification, les préparations pour nourrissons analysées se répartissent comme suit (cf. Annexe 4) :

- **Laits standards (42,62 %)** : Ils constituent la majorité des échantillons et sont destinés aux nourrissons sans besoins nutritionnels spécifiques.
- **Laits spécialisés pour troubles digestifs (27,87 %)** : Formules conçues pour soulager les troubles digestifs courants chez les nourrissons.
- **Laits hypoallergéniques et sans lactose (6,56 %)** : Préparations adaptées aux nourrissons présentant des allergies ou une intolérance au lactose.
- **Formules spéciales enrichies (16,39 %)** : Incluent les formules destinées aux prématurés ou aux bébés ayant des besoins nutritionnels accrus
- **Formules végétales (6,56 %)** : Alternatives aux préparations à base de protéines animales, généralement formulées à partir de protéines végétales (soja, riz, etc.) (Figure 35).

2.1.3. Caractéristiques des mères donneuses de lait maternel et de leurs nourrissons

Les caractéristiques biologiques et démographiques des mères volontaires et de leurs nourrissons sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 45. Caractéristiques démographiques et biologiques des mères donneuses et de leurs nourrissons.

| Caractéristiques | Moyenne ± Ecart type | Intervalle |
|-----------------------------|----------------------|------------|
| Age de la mère (ans) | 32,75± 4,13 | 27–39 |
| Age gestationnel (semaines) | 39,16 ± 0,94 | 38 - 41 |
| Age du nourrisson (jours) | 101,08 ± 48,56 | 15 - 180 |
| Poids à la naissance (g) | 3458,33 ± 314,66 | 3000–4000 |
| Taille à la naissance (cm) | 49,91 ± 1,88 | 47–53 |

L'âge moyen des mères participantes était de 32,75 ans, avec une durée de grossesse moyenne de 39,16 semaines. Les nourrissons étaient âgés en moyenne de 101,08 jours au moment de la collecte, avec un poids de naissance moyen de 3458,33 g et une taille moyenne de 49,91 cm.

Concernant les nourrissons, leur âge variait entre 15 et 180 jours, avec une moyenne de 101,08 jours. Leur poids moyen à la naissance était de 3458,33 g, allant de 3000 à 4000 g, tandis que leur taille moyenne à la naissance était de 49,91 cm, avec des valeurs comprises entre 47 et 53 cm.

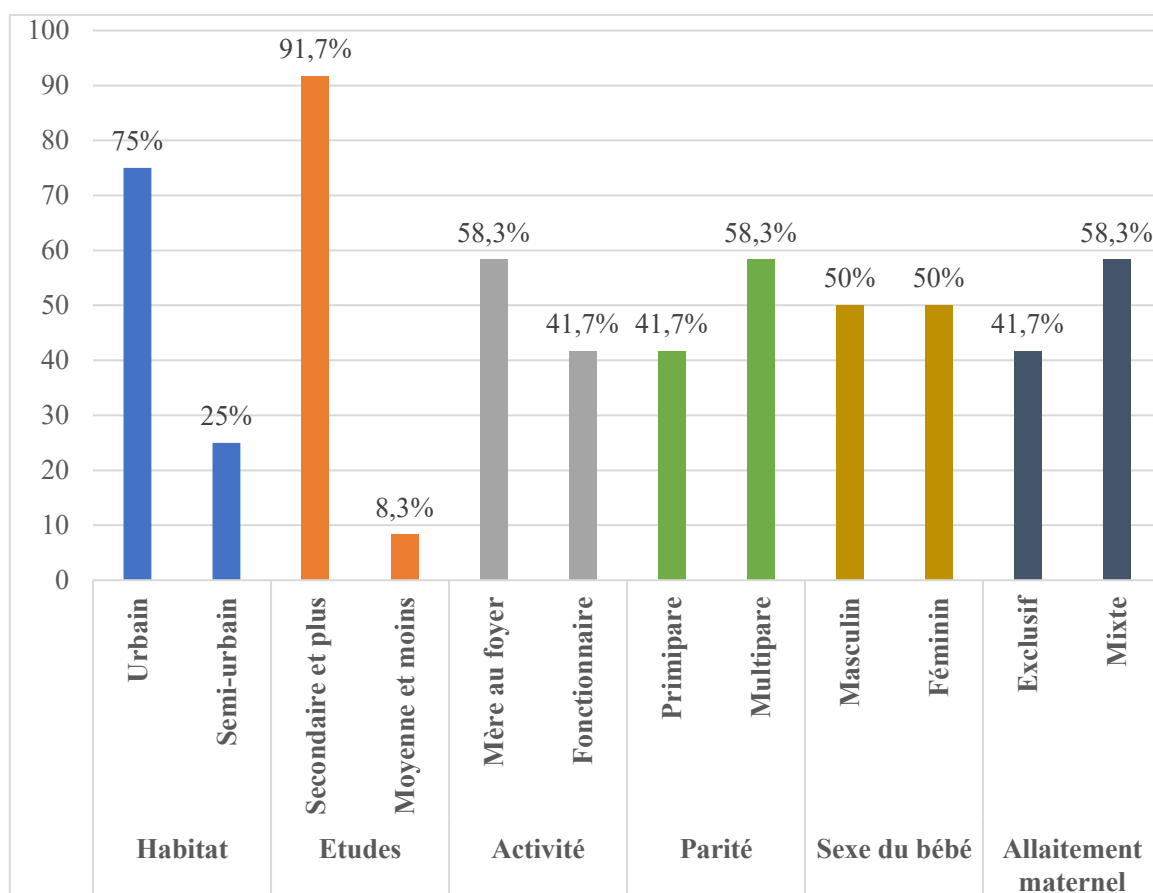


Figure 36. Caractéristiques des mères donneuses de lait maternel et de leurs nourrissons.

Cette figure présente une synthèse graphique des variables suivantes :

- **Lieu de résidence** : 75 % en milieu urbain, 25 % en semi-urbain ;
- **Niveau d'études** : 91,7 % des mères ont un niveau secondaire ou supérieur ;
- **Activité professionnelle** : 58,3 % sont sans emploi (au foyer), 41,7 % sont fonctionnaires ;
- **Parité** : 41,7 % de primipares, 58,3 % de multipares ;
- **Sexe du nourrisson** : Parité exacte, avec 50 % de filles et 50 % de garçons ;
- **Mode d'allaitement** : 41,7 % des nourrissons sont exclusivement allaités au sein, 58,3 % bénéficient d'un allaitement mixte.

2.2. Résultats de la détermination de l'Aluminium

2.2.1. Teneurs moyennes en aluminium dans les échantillons analysés

Tableau 46. Concentrations moyennes en aluminium dans les préparations pour nourrissons (PPN) et le lait maternel.

| Marque / Type | N | Minimum ($\mu\text{g/g}$) | Maximum ($\mu\text{g/g}$) | Moyenne ($\mu\text{g/g}$) | Ecart-type ($\mu\text{g/g}$) |
|----------------------|----|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Lait maternel | 12 | < LOQ | 0,127 | 0,079 | 0,035 |
| PPN (toutes marques) | 61 | < LOQ | 7,000 | 2,645 | 1,480 |

Le Tableau 46 présente les concentrations moyennes en aluminium mesurées dans les préparations pour nourrissons (PPN) comparées à celles du lait maternel. Les concentrations moyennes en aluminium dans le lait maternel restent très faibles, avec une valeur moyenne de 0,079 $\mu\text{g/g}$, contre une moyenne de 2,645 $\mu\text{g/g}$ pour les PPN, toutes marques confondues.

L'écart-type plus élevé (1,480 $\mu\text{g/g}$) dans les PPN indique une variabilité importante entre les produits.

Les valeurs minimales dans les PPN sont inférieures à la limite de quantification (< LOQ).

2.2.2. Comparaison des teneurs en aluminium dans les PPN

2.2.2.1. Comparaison selon la marque

Une analyse comparative a été effectuée afin de détecter des différences entre marques.

Un test de normalité (Shapiro-Wilk) a été utilisé, révélant des distributions non normales pour certaines marques ($p < 0,05$). Un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a donc été appliqué.

- **Statistiques descriptives**

Le Tableau 47 présente les moyennes et écarts types des concentrations en aluminium ($\mu\text{g/g}$) mesurées pour chaque marque analysée.

Tableau 47. Moyennes et écarts types des concentrations en aluminium ($\mu\text{g/g}$) selon la marque.

| Marque | Moyenne ($\mu\text{g/g}$) | Écart type ($\mu\text{g/g}$) |
|--------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Aptamil® | 2,949 | 0,346 |
| Biomil® | 3,834 | 1,656 |
| Celia® | 2,603 | 1,444 |
| France Lait® | 2,625 | 1,419 |
| Guigoz® | 0,059 | 0,083 |
| Modilac® | 7 | - |
| NAN® | 2,28 | 1,212 |
| Novalac® | 2,54 | 0,457 |
| Nursie® | 2,314 | 1,006 |
| Primalac® | 1,358 | 0,668 |

Les concentrations les plus élevées ont été observées chez Modilac® (7,00 $\mu\text{g/g}$) et Biomil® (3,83 $\mu\text{g/g}$), tandis que Guigoz® (0,059 $\mu\text{g/g}$) et Primalac® (1,358 $\mu\text{g/g}$) présentaient les plus faibles.

L'écart-type élevé pour Biomil® (1,656 $\mu\text{g/g}$) et Celia® (1,444 $\mu\text{g/g}$) indique une forte variabilité intra-marque.

- **Résultats du test Kruskal-Wallis.**

Tableau 48. Résultats du test Kruskal-Wallis.

| Test | N total | Statistique de test | Degré de liberté | p-value | Décision |
|-----------------------|---------|---------------------|------------------|--------------|-------------|
| Kruskal-Wallis | 61 | 20,97 | 9 | 0,013 | Rejet H_0 |

Le test de Kruskal-Wallis indique une différence significative entre les concentrations en aluminium des différentes marques ($p = 0,013$). Cela signifie que toutes les marques n'ont pas les mêmes niveaux de contamination (Tableau 48).

Après l'application du test de Kruskal-Wallis, une analyse post-hoc a été réalisée pour identifier les différences significatives entre les marques de préparations pour nourrissons (PPN) en

termes de concentration en aluminium ($\mu\text{g/g}$). La correction de Bonferroni a été appliquée pour ajuster les valeurs p des comparaisons multiples. Ce boxplot permet de visualiser ces différences entre les marques.

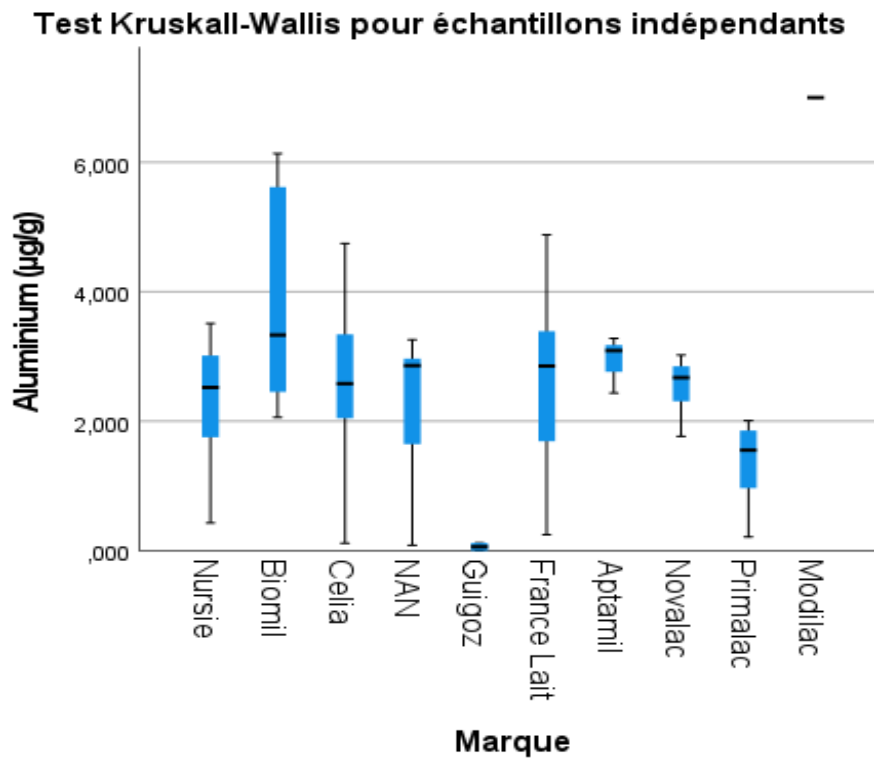


Figure 37. Distribution des concentrations en aluminium selon la marque (Boxplot – Kruskal-Wallis).

Les médianes varient considérablement, avec des dispersions notables chez Biomil®, Celia® et France Lait®, ce qui indique une hétérogénéité intra-marque (Figure 37).

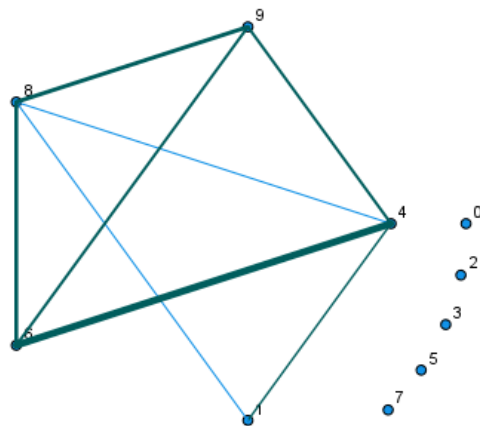
Tableau 49. Comparaisons significatives des concentrations en aluminium entre les marques de préparations pour nourrissons (test post-hoc de Dunn-Bonferroni).

| Comparaison | Statistique de test | Signification (p) | Interprétation |
|-------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Guigoz® - France Lait® | -2,12 | 0,034 | France Lait® présente une teneur significativement plus élevée. |
| Guigoz® - Celia® | 2,113 | 0,035 | Celia® affiche une concentration plus élevée. |
| Guigoz® - Aptamil® | -2,484 | 0,013 | Aptamil® contient davantage d'aluminium. |
| Guigoz® - Biomil® | 2,895 | 0,004 | Biomil® présente une teneur nettement plus élevée. |
| Guigoz® - Modilac® | -2,691 | 0,007 | Modilac® possède une concentration supérieure. |
| Primalac®-France Lait® | 2,164 | 0,03 | France Lait® a une teneur plus élevée. |
| Primalac® - Celia® | 2,133 | 0,033 | Celia® contient davantage d'aluminium. |
| Primalac® - Aptamil® | 2,595 | 0,009 | Aptamil® montre une concentration plus élevée. |
| Primalac® - Biomil® | 3,385 | 0,001 | Biomil® affiche la teneur la plus élevée. |
| Primalac® - Modilac® | -2,582 | 0,01 | Modilac® contient significativement plus d'aluminium. |

L'analyse post-hoc, présentée dans le Tableau 49, vient appuyer les résultats du test de Kruskal-Wallis, en révélant des différences significatives entre les marques. Les marques Guigoz® et Primalac® présentent les teneurs les plus faibles en aluminium, tandis que Biomil® et Modilac® se distinguent par des concentrations nettement plus élevées ($p < 0,05$).

Ces différences mettent en évidence l'impact potentiel des formulations spécifiques ou des procédés industriels propres à chaque marque.

Comparaisons appariées de Marque



Chaque nœud contient le rang moyen de l'échantillon de Marque .

0=Biomil 1=Celia 2=NAN 3=Guigoz 4=France lait 5=Aptamil 6=Novalac 7=Primalac 8=Modilac 9=Nursie

Figure 38. Comparaisons post-hoc des concentrations en aluminium selon les marques (Rangs moyens).

Ce graphique illustre les comparaisons appariées entre les marques de préparations pour nourrissons, établies à partir de leurs rangs moyens de concentration en aluminium. Chaque nœud représente une marque spécifique, tandis que les lignes reliant deux nœuds signalent l'absence de différence statistiquement significative entre ces marques, selon les résultats du test post-hoc corrigé du Kruskal-Wallis.

Plus la distance entre deux nœuds est grande (c'est-à-dire plus l'écart entre les rangs moyens est important), plus la différence de concentration en aluminium est significative. Cela traduit une hétérogénéité marquée entre les marques concernées.

2.2.2.2. Comparaison des concentrations en aluminium selon la classe des PPN

- **Statistiques descriptives**

Le Tableau 50 présente les moyennes et écarts types des concentrations en aluminium ($\mu\text{g/g}$) pour chaque classe de PPN.

Tableau 50. Moyennes et écarts types des concentrations en aluminium selon la classe de PPN.

| Classe | Moyenne ($\mu\text{g/g}$) | Ecart type ($\mu\text{g/g}$) |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Formules spéciales enrichies | 2,373 | 0,672 |
| Formules végétales | 5,898 | 0,251 |
| Laits Standards | 2,777 | 1,420 |
| Laits hypoallergéniques/sans lactose | 2,354 | 0,641 |
| Laits spécialisés pour troubles digestifs | 2,580 | 0,752 |

On observe une variabilité notable, avec des concentrations plus élevées dans les formules végétales (5,898 $\mu\text{g/g}$) comparées aux autres classes, notamment les formules spéciales enrichies (2,373 $\mu\text{g/g}$) ou les laits hypoallergéniques/sans lactose (2,354 $\mu\text{g/g}$).

- **Tests de normalité**

Avant toute comparaison statistique, la normalité des données a été évaluée à l'aide des tests de Kolmogorov-Smirnov (KS) et Shapiro-Wilk (SW). Le Tableau 51 synthétise les résultats.

Tableau 51. Résultats des tests de normalité des concentrations en aluminium selon la catégorie de lait infantile.

| Catégorie | Kolmogorov-Smirnov (KS) | ddl | p-value KS | Shapiro-Wilk (SW) | ddl | p-value SW |
|--------------------------------------------------|-------------------------|-----|------------|-------------------|-----|------------|
| Standard | 0,105 | 26 | 0,200 | 0,96 | 26 | 0,395 |
| Laits spécialisés pour troubles digestifs | 0,254 | 17 | 0,005 | 0,772 | 17 | < 0,001 |
| Laits hypoallergéniques et sans lactose | 0,397 | 4 | - | 0,732 | 4 | 0,026 |
| Formules spéciales enrichies | 0,151 | 10 | 0,200 | 0,942 | 10 | 0,576 |
| Formules végétales | 0,276 | 4 | - | 0,913 | 4 | 0,500 |

Note : Les valeurs « - » indiquent que le test KS n'a pas été interprété en raison de la taille réduite de l'échantillon.

Les résultats montrent que les laits standards, les formules enrichies et les formules végétales suivent une distribution normale ($p > 0,05$), tandis que les laits pour troubles digestifs et les laits hypoallergéniques / sans lactose présentent des distributions significativement non normales ($p < 0,05$).

En raison de cette hétérogénéité, le recours à des tests paramétriques comme l'ANOVA n'est pas approprié. L'analyse comparative entre groupes a donc été réalisée à l'aide du test non paramétrique de Kruskal-Wallis, plus adapté à la nature des données observées (Tableau 52).

Tableau 52. Résultats du test de Kruskal-Wallis appliqué aux catégories de lait infantile.

| N total | Statistiques de test | Degré de liberté | Sig. asymptotique (test bilatéral) |
|---------|----------------------|------------------|------------------------------------|
| 61 | 12,629 | 4 | 0,013 |

Le test de Kruskal-Wallis met en évidence une différence statistiquement significative entre les différentes catégories de lait infantile ($p = 0,013$). Cette variation suggère que les concentrations en aluminium diffèrent selon le type de formule utilisée, justifiant une analyse post-hoc pour identifier les groupes concernés par ces écarts.

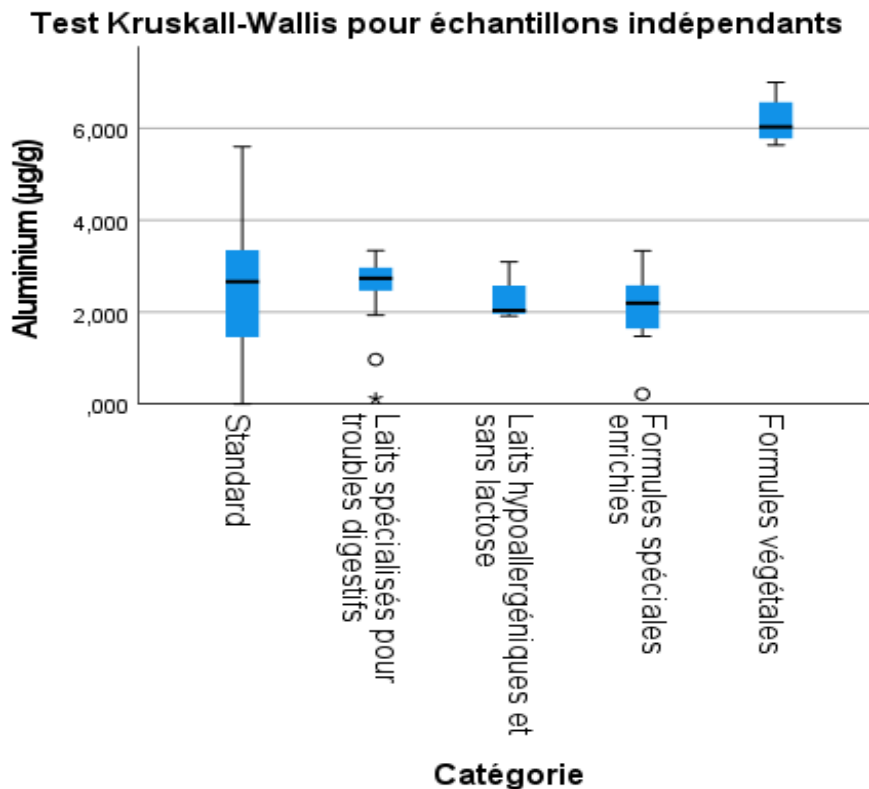


Figure 39. Distribution des concentrations en aluminium selon les catégories de lait infantile (Boxplot).

Ce diagramme en boîtes représente la distribution des concentrations en aluminium selon les différentes catégories de préparations pour nourrissons. Il met en évidence que les formules végétales affichent les teneurs les plus élevées, avec une médiane nettement supérieure à celle des autres groupes. Par contre, les laits hypoallergéniques/sans lactose et les formules spécialisées pour troubles digestifs présentent des concentrations plus faibles et relativement homogènes, traduisant une variabilité intra-groupe réduite.

- **Analyse post-hoc : Comparaisons entre catégories de laits infantiles**

A la suite du test de Kruskal-Wallis, des comparaisons post-hoc ont été réalisées afin d'identifier précisément quelles catégories de préparations pour nourrissons présentaient des différences significatives en termes de concentration en aluminium. Le Tableau 53 présente les résultats de ces comparaisons.

Tableau 53. Comparaisons post-hoc des concentrations en aluminium entre les catégories de lait infantile (correction de Bonferroni)

| Catégories comparées | Statistique de test | Erreur standard | Statistique standardisée | p-value ajustée |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| Formules spéciales enrichies - Laits hypoallergéniques et sans lactose | 0,95 | 10,502 | 0,09 | 1 |
| Formules spéciales enrichies - Laits standards | 6,931 | 6,606 | 1,049 | 1 |
| Formules spéciales enrichies - Laits spécialisés pour troubles digestifs | 7,45 | 7,075 | 1,053 | 1 |
| Formules spéciales enrichies - Formules végétales | -35,95 | 10,502 | -3,423 | 0,006 |
| Laits hypoallergéniques et sans lactose - Laits standards | 5,981 | 9,535 | 0,627 | 1 |
| Laits hypoallergéniques et sans lactose - Laits spécialisés pour troubles digestifs | 6,5 | 9,865 | 0,659 | 1 |
| Laits hypoallergéniques et sans lactose - Formules végétales | -35 | 12,553 | -2,788 | 0,053 |
| Laits standards - Laits spécialisés pour troubles digestifs | -0,519 | 5,537 | -0,094 | 1 |
| Laits standards - Formules végétales | -29,019 | 9,535 | -3,044 | 0,023 |
| Laits spécialisés pour troubles digestifs - Formules végétales | -28,5 | 9,865 | -2,889 | 0,039 |

Les résultats post-hoc (avec correction de Bonferroni) indiquent que la catégorie Formules végétales se distingue significativement des autres, avec des différences marquées par rapport aux :

- **Formules enrichies** ($p = 0,006$),
- **Laits standards** ($p = 0,023$),
- **Laits pour troubles digestifs** ($p = 0,039$).

La comparaison avec les laits hypoallergéniques/sans lactose approche le seuil de signification ($p = 0,053$).

Ces résultats confirment que les formules végétales présentent des concentrations en aluminium nettement plus élevées. Ils traduisent un profil distinct par rapport aux autres types de préparations infantiles.

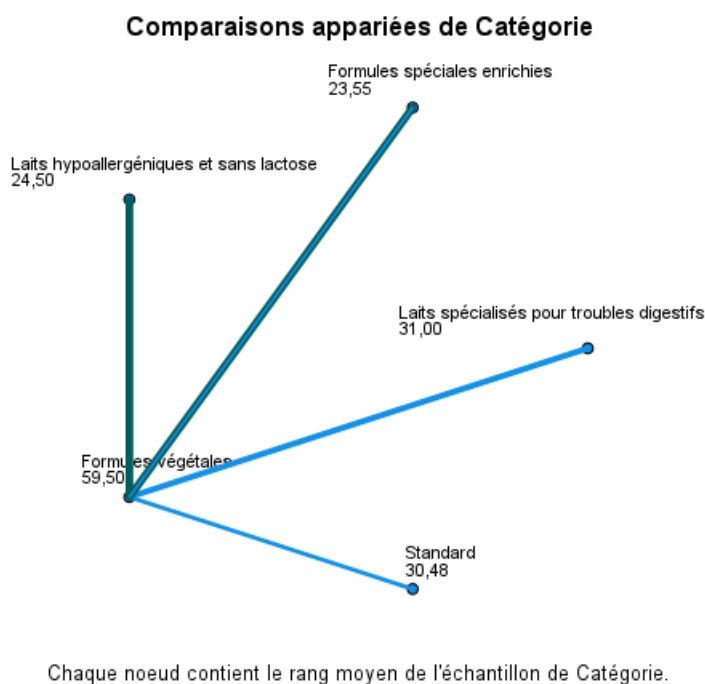


Figure 40. Comparaison des catégories de lait selon les rangs moyens des concentrations en aluminium (Kruskal-Wallis).

Cette figure illustre les écarts entre les différentes catégories de préparations pour nourrissons, sur la base de leurs rangs moyens de concentration en aluminium. Les formules végétales se distinguent par le rang moyen le plus élevé, indiquant des niveaux d'aluminium significativement supérieurs.

A l'inverse, les laits hypoallergéniques et ceux destinés aux troubles digestifs présentent des rangs moyens plus faibles, traduisant des concentrations relativement plus faibles en aluminium.

2.2.2.3. Comparaison des concentrations en aluminium entre le lait maternel et les PPN standards de 1^{er} âge

Dans le but de comparer les niveaux d'aluminium présents dans le lait maternel et dans les préparations pour nourrissons standards de 1^{er} âge, une analyse statistique comparative a été menée. Celle-ci a été précédée d'un test de normalité afin de déterminer la nature de la distribution des données et d'orienter le choix du test approprié.

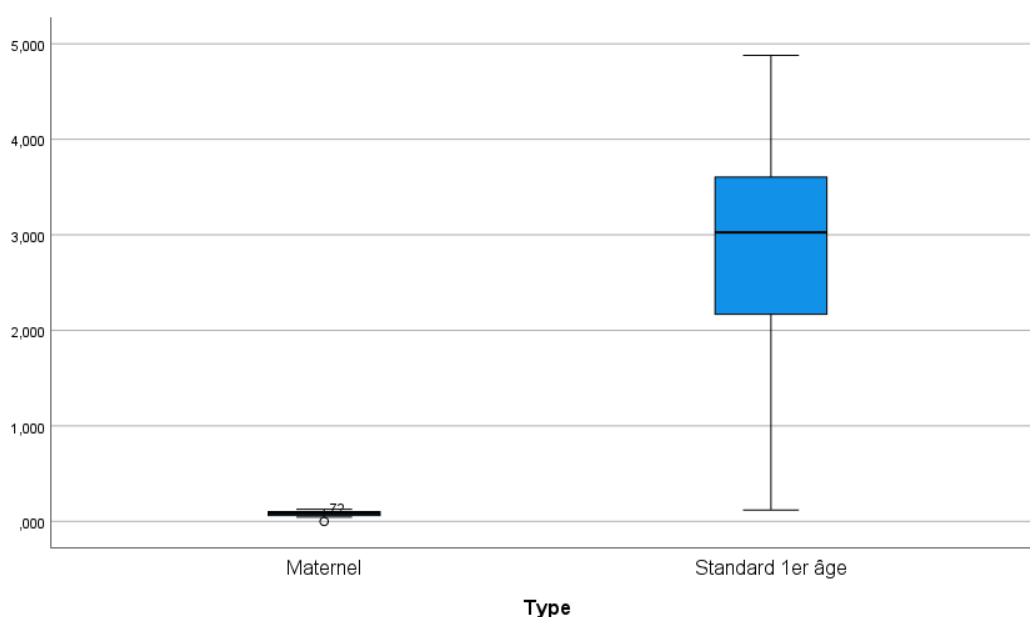


Figure 41. Distribution des concentrations en aluminium dans le lait maternel et les laits standards de 1^{er} âge.

Ce diagramme (Figure 41) présente la répartition des concentrations en aluminium (exprimées en $\mu\text{g/g}$) dans les deux types de lait. Une différence marquée est observée entre les groupes : les préparations infantiles standards de 1^{er} âge affichent des concentrations nettement plus élevées que le lait maternel. Cette disparité apparente a été soumise à un test de normalité préalable, en vue de valider les conditions d'application d'un test paramétrique pour la comparaison des moyennes.

- **Test de normalité**

Afin de déterminer la nature de la distribution des concentrations en aluminium dans le lait maternel et les préparations infantiles standards de 1^{er} âge, des tests de normalité ont été réalisés

à l'aide des méthodes de Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk. Les résultats sont présentés dans le tableau 54.

Tableau 54. Résultats des tests de normalité appliqués aux concentrations en aluminium dans le lait maternel et les laits standards de 1^{er} âge.

| Type | Kolmogorov-Smirnov | | | Shapiro-Wilk | | |
|-------------------------------------|--------------------|-----|--------|--------------|-----|-------|
| | Statistiques | ddl | Sig. | Statistiques | ddl | Sig. |
| Aluminium ($\mu\text{g/g}$) | | | | | | |
| Lait maternel | 0,143 | 12 | 0,200* | 0,942 | 12 | 0,525 |
| Laits standards 1 ^{er} âge | 0,168 | 12 | 0,200* | 0,953 | 12 | 0,687 |

0,200* correspond à la borne inférieure de la vraie signification.

Les valeurs de $p > 0,05$ obtenues pour les deux tests confirment que les distributions des concentrations en aluminium dans les deux groupes sont compatibles avec une loi normale. Cette condition permet l'utilisation d'un test paramétrique t de Student pour la comparaison des moyennes.

- **Test des échantillons indépendants**

La comparaison des moyennes a été réalisée à l'aide du test t de Student pour échantillons indépendants, précédé d'un test de Levene afin d'évaluer l'homogénéité des variances (Tableau 55).

Tableau 55. Résultats du test t de Student comparant les concentrations en aluminium entre le lait maternel et les laits infantiles standards de 1^{er} âge.

| Test | F | Sig. | t | ddl | Sig. (bilatérale) | Différence moyenne ($\mu\text{g/g}$) | IC 95 % Inf. | IC 95 % Sup. |
|-----------------------------------|--------|---------|--------|--------|-------------------|----------------------------------------|--------------|--------------|
| Test de Levene | 14,789 | < 0,001 | - | - | - | - | - | - |
| t de Student | - | - | -7,607 | 22 | < 0,001 | -2,75 | -3,5 | -2 |
| t de Student (variances inégales) | - | - | -7,607 | 11,018 | < 0,001 | -2,75 | -3,55 | -1,95 |

Les résultats du test de Levene indiquent une hétérogénéité significative des variances ($p < 0,001$), justifiant l'application du test t de Student avec correction pour variances inégales. Ce test révèle une différence hautement significative ($p < 0,001$) entre les deux groupes : les laits infantiles standards de 1^{er} âge présentent une concentration moyenne en aluminium supérieure de 2,75 $\mu\text{g/g}$ par rapport au lait maternel.

- **Mesures de l'effet**

Pour quantifier l'ampleur de cette différence, trois (03) indicateurs de taille d'effet ont été calculés : le d de Cohen, la correction de Hedges et le delta de Glass (Tableau 56).

Tableau 56. Estimation des tailles d'effet pour la comparaison entre le lait maternel et les laits standards de 1^{er} âge.

| Type de mesure | Valeur de l'effet | Estimation (points) | IC 95% Inf. | IC 95% Sup. |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|-------------|-------------|
| d de Cohen | 0,885 | -3,105 | -4,303 | -1,877 |
| Correction de Hedges | 0,917 | -2,998 | -4,154 | -1,812 |
| Delta de Glass | 1,252 | -2,197 | -3,384 | -0,967 |

Le d de Cohen (0,885) indique une grande taille d'effet, confirmée par la correction de Hedges. Le delta de Glass, fondé sur l'écart-type du lait maternel, montre un effet encore plus prononcé (1,252). Ces résultats renforcent l'évidence statistique d'une différence significative et cliniquement pertinente entre les deux types de lait.

2.2.2.4. Comparaison des concentrations en aluminium selon l'étape d'alimentation du nourrisson

L'objectif de cette analyse est de déterminer si les concentrations en aluminium diffèrent selon l'étape d'alimentation ciblée par les préparations pour nourrissons (PPN). Plusieurs tests statistiques ont été appliqués afin d'évaluer la distribution des données, l'homogénéité des variances et la significativité des différences entre groupes.

- **Statistiques descriptives**

Le Tableau 57 présente les moyennes et écarts types des concentrations en aluminium (exprimées en µg/g) pour chaque étape d'alimentation.

Tableau 57. Moyennes et écarts types des concentrations en aluminium (µg/g) selon l'étape d'alimentation.

| Étape | Moyenne (µg/g) | Ecart type (µg/g) |
|----------------------------|----------------|-------------------|
| 1^{er} âge | 2,974 | 0,701 |
| 2^{ème} âge | 2,470 | 1,428 |
| De 0 à 12 mois | 3,252 | 1,824 |
| Pré | 2,151 | 0,807 |

Les préparations destinées aux nourrissons de 0 à 12 mois présentent la concentration moyenne en aluminium la plus élevée (3,252 µg/g), tandis que les formules « Pré » et « 2^{ème} âge » affichent des teneurs moyennes plus faibles.

- **Test de normalité**

Afin de vérifier la normalité des distributions, les tests de Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk ont été appliqués (Tableau 58).

Tableau 58. Résultats des tests de normalité selon l'étape du lait.

| Etape | KS Stat. | ddl | p-value (KS) | SW Stat. | ddl | p-value (SW) |
|-----------------------|----------|-----|--------------|----------|-----|--------------|
| 1er âge | 0,168 | 22 | 0,109 | 0,952 | 22 | 0,344 |
| 2ème âge | 0,143 | 20 | 0,200 * | 0,925 | 20 | 0,124 |
| Pré | 0,235 | 4 | — | 0,9 | 4 | 0,432 |
| De 0 à 12 mois | 0,219 | 15 | 0,051 | 0,92 | 15 | 0,194 |

0,200* représente la borne inférieure de la signification réelle.

Une valeur de $p > 0,05$ indique que les données ne diffèrent pas significativement d'une distribution normale.

Les résultats indiquent que toutes les étapes présentent des distributions normales ($p > 0,05$), ce qui autorise l'utilisation d'un test paramétrique pour la comparaison des moyennes.

- **Test d'homogénéité des variances**

L'homogénéité des variances a été testée à l'aide du test de Levene. Le Tableau 59 présente les résultats de ce test.

Tableau 59. Résultats du test de Levene.

| Méthode | Statistique de Levene | ddl1 | ddl2 | p-value (Sig.) |
|------------------------------------------|-----------------------|------|--------|----------------|
| Basé sur la moyenne | 3,25 | 3 | 57,000 | 0,028 |
| Basé sur la médiane | 2,724 | 3 | 57,000 | 0,053 |
| Basé sur la médiane (ddl ajustés) | 2,724 | 3 | 45,633 | 0,055 |
| Basé sur la moyenne tronquée | 3,260 | 3 | 57,000 | 0,028 |

La valeur p inférieure à 0,05 (notamment pour la moyenne) indique une violation de l'hypothèse d'égalité des variances, ce qui rend inadaptée l'application d'une ANOVA classique. Une ANOVA de Welch, plus robuste aux inégalités de variance, a donc été privilégiée.

- **Statistiques descriptives complémentaires**

Le Tableau 60 présente, pour chaque étape, le nombre d'échantillons (N), la moyenne, l'écart type, ainsi que les valeurs minimale et maximale des concentrations mesurées.

Tableau 60. Statistiques descriptives des concentrations en aluminium selon l'étape d'alimentation.

| Etape | N | Moyenne ($\mu\text{g/g}$) | Ecart-type | Min | Max |
|----------------------|----|-----------------------------|------------|-------|-------|
| 1 ^{er} âge | 22 | 2,710 | 0,970 | 0,118 | 4,880 |
| 2 ^{ème} âge | 20 | 2,200 | 1,500 | 0,000 | 5,600 |
| Pré | 4 | 2,150 | 0,810 | 1,470 | 3,260 |
| De 0 à 12 mois | 15 | 3,270 | 2,020 | 0,117 | 7,000 |
| Total | 61 | 2,650 | 1,490 | 0,000 | 7,000 |

Le groupe « De 0 à 12 mois » présente à la fois la moyenne la plus élevée (3,27 $\mu\text{g/g}$) et la plus grande dispersion des valeurs (Ecart type : 2,02), ce qui explique en partie les résultats du test de Levene.

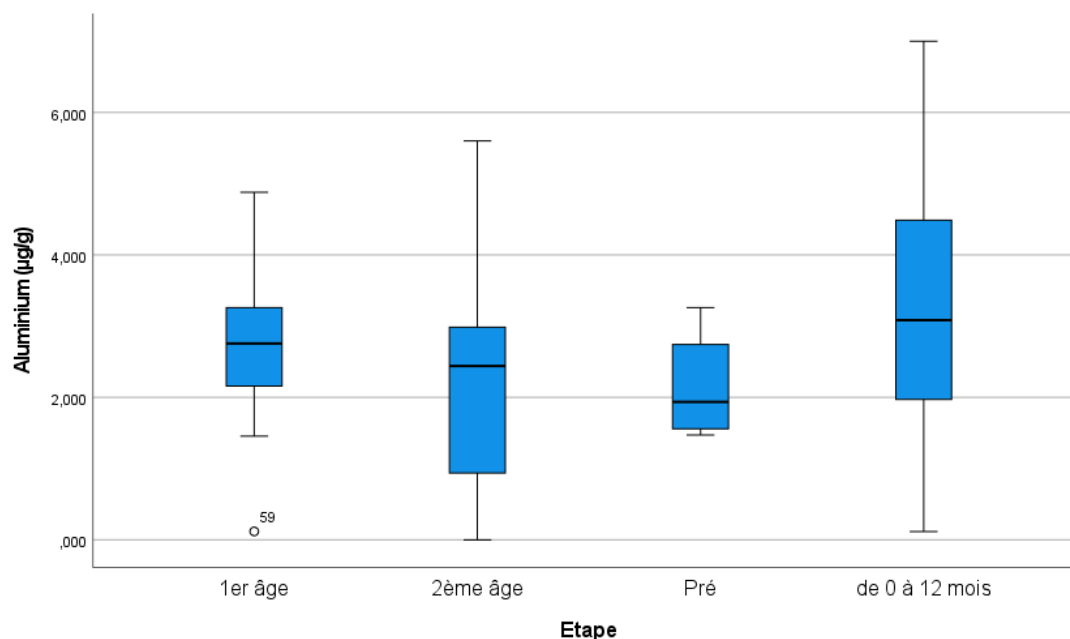


Figure 42. Distribution des concentrations en aluminium selon l'étape d'alimentation.

Ce diagramme en boîtes montre la répartition des concentrations en aluminium ($\mu\text{g/g}$) selon les différentes étapes. On remarque que :

- Le groupe « De 0 à 12 mois » présente une médiane plus élevée et une large dispersion;
- Les groupes « 1^{er} âge » et « 2^{ème} âge » ont des profils relativement proches ;
- Les formules « Pré » présentent les valeurs les plus faibles avec une variabilité réduite.

- **Analyse des moyennes : ANOVA de Welch**

Etant donné l'hétérogénéité des variances observée, le test de Welch a été appliqué pour comparer les moyennes entre les groupes (Tableau 61).

Tableau 61. Résultats de l'ANOVA de Welch.

| Test | Statistique | ddl1 | ddl2 | p-value (Sig.) |
|--------------|-------------|------|--------|----------------|
| Welch | 1,388 | 3 | 14,483 | 0,286 |

Les résultats du test de Welch indiquent une absence de différence significative entre les concentrations moyennes en aluminium selon l'étape d'alimentation ($p = 0,286$).

2.2.2.5. Comparaison des concentrations en aluminium selon le fabricant

Une analyse des concentrations en aluminium a été réalisée en fonction des différents fabricants de préparations pour nourrissons (PPN), dans le but d'identifier d'éventuelles disparités attribuables aux procédés de fabrication, aux matières premières ou aux conditions de conditionnement. Avant d'appliquer les tests comparatifs, des tests de normalité ont été menés pour déterminer l'approche statistique la plus appropriée.

- **Test de normalité**

Le Tableau 62 présente les résultats des tests de normalité pour chaque fabricant.

Tableau 62. Résultats du test de normalité selon le fabricant.

| Fabricant | Kolmogorov-Smirnov Stat. | ddl | Sig. | Shapiro-Wilk Stat. | ddl | Sig. |
|-------------------------|--------------------------|-----|--------|--------------------|-----|--------------|
| Nestlé | 0,261 | 8 | 0,116 | 0,805 | 8 | 0,032 |
| Blédina | 0,162 | 8 | 0,200* | 0,945 | 8 | 0,661 |
| Celia | 0,178 | 7 | 0,200* | 0,967 | 7 | 0,88 |
| Fasska | 0,232 | 11 | 0,101 | 0,827 | 11 | 0,022 |
| Regilait | 0,147 | 8 | 0,200* | 0,987 | 8 | 0,99 |
| UP International | 0,209 | 7 | 0,200* | 0,909 | 7 | 0,391 |
| Hochdorf Swiss | 0,225 | 6 | 0,200* | 0,906 | 6 | 0,412 |

0,200 représente la borne inférieure de la signification réelle.*

Les résultats du test de Shapiro-Wilk indiquent que les données de Nestlé ($p = 0,032$) et Fasska ($p = 0,022$) s'écartent significativement de la normalité. Dès lors, une approche non paramétrique a été retenue pour l'analyse comparative.

- Analyse comparative : Test de Kruskal-Wallis

Tableau 63. Résultats du test de Kruskal-Wallis

| N total | Statistiques de test | Degré de liberté | p-value (bilatérale) |
|---------|----------------------|------------------|----------------------|
| 61 | 17,732 | 9 | 0,038 |

Le test de Kruskal-Wallis met en évidence une différence statistiquement significative entre les fabricants ($p = 0,038$), suggérant que les concentrations en aluminium varient selon l'origine industrielle des PPN (Tableau 63).

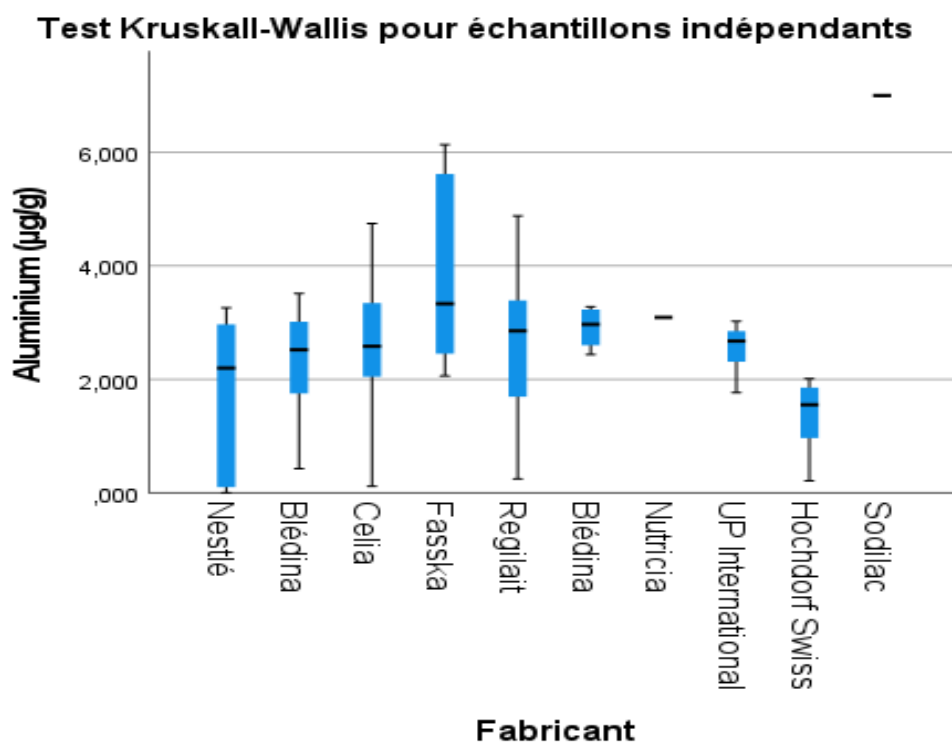


Figure 43. Comparaison des concentrations en aluminium selon le fabricant.

La Figure 43 illustre les différences de concentrations en aluminium (exprimées en $\mu\text{g/g}$) entre les différents fabricants de préparations pour nourrissons. Les principales observations sont les suivantes :

- Hochdorf Swiss présente les teneurs les plus élevées.
- Fasska révèle une forte dispersion des valeurs, avec plusieurs concentrations élevées.
- Nestlé et Blédina indiquent des concentrations plus faibles et une distribution plus homogène.
- Sodilac est représenté par un seul échantillon, limitant les possibilités de comparaison.

- Comparaisons post-hoc : Test de Games-Howell

Suite à la détection de différences significatives entre les fabricants, des comparaisons multiples ont été effectuées à l'aide du test de Games-Howell. Le Tableau 64 présente les résultats de ces comparaisons, en mettant en évidence les écarts significatifs de concentrations en aluminium entre certains fabricants.

Tableau 64. Comparaisons multiples des concentrations en aluminium selon le fabricant (Test de Games-Howell).

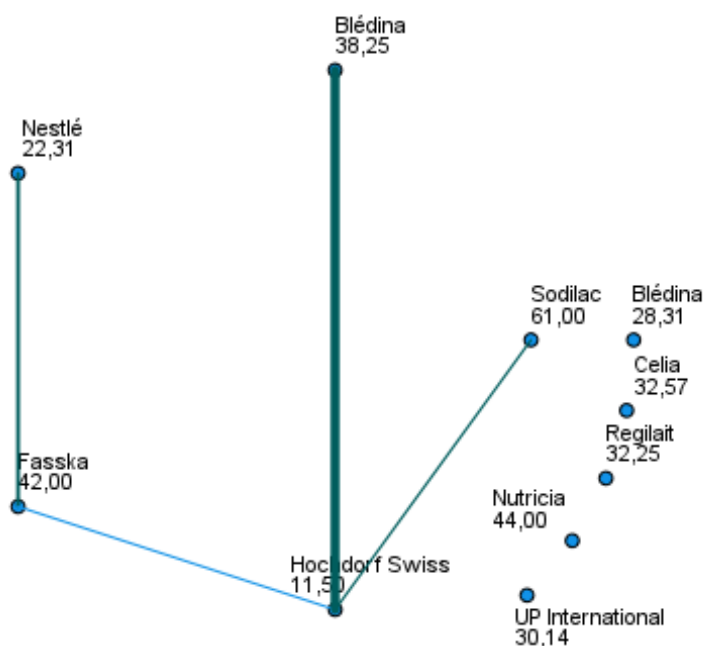
| | Statistiques de test | Erreur standard | Stat. standardisée | p-value | p ajustée (Bonferroni) |
|---------------------------------|----------------------|-----------------|--------------------|---------|------------------------|
| Hochdorf Swiss-Blédina | 16,813 | 9,587 | 1,754 | 0,079 | 1,000 |
| Hochdorf Swiss-UP International | 18,643 | 9,877 | 1,888 | 0,059 | 1,000 |
| Hochdorf Swiss-Regilait | 20,750 | 9,587 | 2,164 | 0,030 | 1,000 |
| Hochdorf Swiss-Celia | 21,071 | 9,877 | 2,133 | 0,033 | 1,000 |
| Hochdorf Swiss-Blédina | 26,750 | 11,459 | 2,334 | 0,020 | 0,881 |
| Hochdorf Swiss-Fasska | 30,500 | 9,010 | 3,385 | 0,001 | 0,032 |
| Hochdorf Swiss-Nutricia | 32,500 | 19,175 | 1,695 | 0,090 | 1,000 |
| Hochdorf Swiss-Sodilac | -49,500 | 19,175 | -2,582 | 0,010 | 0,443 |
| Nestlé-Fasska | -19,688 | 8,249 | -2,387 | 0,017 | 0,765 |
| Nestlé-Sodilac | -38,688 | 18,829 | -2,055 | 0,040 | 1,000 |
| Blédina-Fasska | -13,688 | 8,249 | -1,659 | 0,097 | 1,000 |
| Celia-Sodilac | -28,429 | 18,978 | -1,498 | 0,134 | 1,000 |

L'analyse post-hoc avec correction de Bonferroni met en évidence une seule différence significative après ajustement :

- Hochdorf Swiss présente une concentration en aluminium significativement plus élevée que Fasska ($p = 0,032$).

Les autres comparaisons n'atteignent pas le seuil de signification statistique après correction, bien que certains p-values non ajustés soient inférieures à 0,05.

Comparaisons appariées de Fabricant



Chaque nœud contient le rang moyen de l'échantillon de Fabricant.

Figure 44. Rangs moyens des concentrations en aluminium selon le fabricant.

Cette figure représente les comparaisons appariées entre fabricants selon le rang moyen de concentration en aluminium issu du test de Kruskal-Wallis. Chaque nœud représente un fabricant :

- **Sodilac** (échantillon n° 61) affiche le rang moyen le plus élevé, suivi de **Nutricia** (n° 44).
- **Fasska** et **Blédina** (échantillons n° 42, 38, 25) montrent également des rangs moyens relativement hauts.
- A l'inverse, **Hochdorf Swiss** (échantillons n° 11, 5) présente les rangs moyens les plus bas.

Les fabricants **Nestlé** (n° 22, 31) et **UP International** (n° 30, 14) occupent des positions intermédiaires.

2.2.3. Evaluation des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) d'Aluminium chez les nourrissons

Afin d'estimer l'exposition des nourrissons à l'aluminium via l'alimentation lactée, les Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) ont été calculées en $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{semaine}$. Ces calculs ont pris en compte l'âge, le sexe et le poids corporel des nourrissons, à partir des 61 échantillons de préparations pour nourrissons (PPN) analysés, soit un total de 1 586 valeurs simulées couvrant les 12 premiers mois de vie.

L'objectif principal est de comparer les DHI estimées aux valeurs de référence sanitaires :

- La Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) fixée par l'EFSA (1 mg/kg/semaine),
- Et la Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire (DHTP) définie par le JECFA (2 mg/kg/semaine).

Une distinction a été faite entre garçons et filles, afin de refléter les différences de poids corporel observées durant la première année de vie, et ainsi affiner les estimations de l'exposition.

Le calcul des DHI repose sur la quantité de poudre utilisée par biberon, déterminée par le poids moyen des cuillères doseuses fournies avec chaque formule. Le tableau suivant présente les valeurs relevées pour chaque échantillon.

Tableau 65. Poids par cuillère de PPN (g).

| Code | Poids (g) | Code | Poids (g) | Code | Poids (g) | Code | Poids (g) |
|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| L1 | 4,589 | L17 | 4,913 | L33 | 5,636 | L49 | 4,491 |
| L2 | 4,502 | L18 | 4,987 | L34 | 5,014 | L50 | 5,548 |
| L3 | 4,791 | L19 | 5,271 | L35 | 5,139 | L51 | 4,813 |
| L4 | 4,487 | L20 | 5,249 | L36 | 4,821 | L52 | 4,534 |
| L5 | 4,359 | L21 | 4,643 | L37 | 4,635 | L53 | 4,597 |
| L6 | 4,429 | L22 | 5,410 | L38 | 4,551 | L54 | 5,184 |
| L7 | 4,492 | L23 | 5,747 | L39 | 3,445 | L55 | 5,143 |
| L8 | 5,253 | L24 | 5,217 | L40 | 4,824 | L56 | 4,949 |
| L9 | 4,468 | L25 | 5,399 | L41 | 4,978 | L57 | 4,902 |
| L10 | 5,281 | L26 | 5,745 | L42 | 4,743 | L58 | 5,176 |
| L11 | 4,726 | L27 | 5,438 | L43 | 5,031 | L59 | 4,980 |
| L12 | 4,770 | L28 | 5,264 | L44 | 5,053 | L60 | 5,015 |
| L13 | 5,233 | L29 | 5,475 | L45 | 4,211 | L61 | 5,247 |
| L14 | 4,788 | L30 | 5,301 | L46 | 4,428 | | |
| L15 | 5,541 | L31 | 5,395 | L47 | 5,127 | | |
| L16 | 5,428 | L32 | 5,360 | L48 | 4,159 | | |

On observe une variation importante du poids par cuillère selon la marque, allant de 3,445 g à 5,747 g, influençant directement la quantité totale d'aluminium ingérée par biberon.

2.2.3.1. Comparaison des DHI aux seuils de sécurité

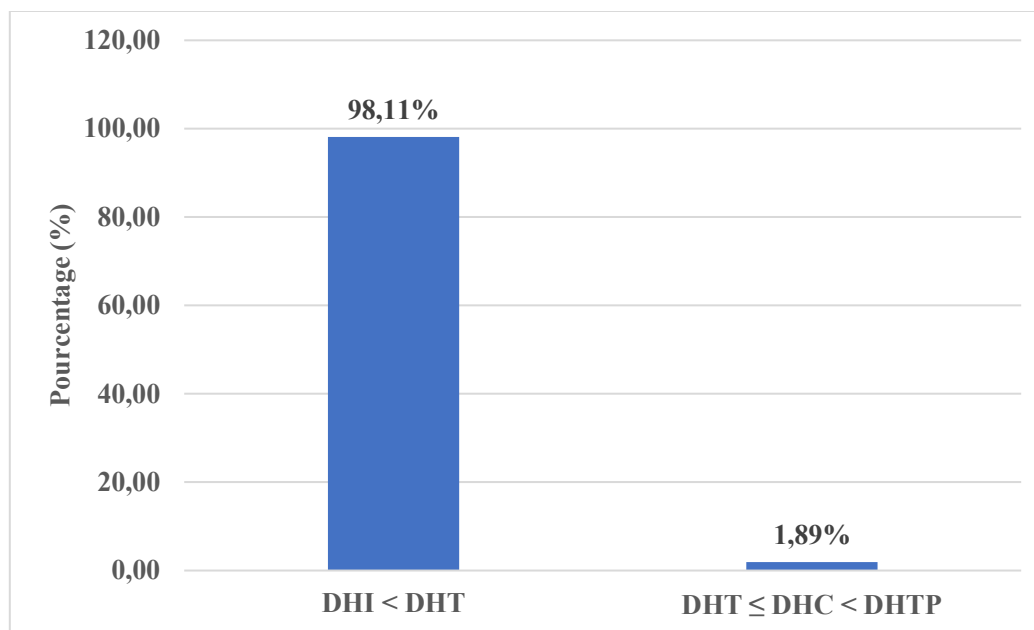


Figure 45. Comparaison des DHI aux normes (EFSA, JECFA).

La Figure illustre la répartition des DHI par rapport aux seuils réglementaires. L'analyse des résultats montre que :

- 98,1 % des échantillons présentent des DHI inférieures à la DHT (1 mg/kg/semaine), ce qui suggère un niveau d'exposition généralement acceptable.
- 1,9 % des échantillons dépassent la DHT, sans excéder la DHTP (2 mg/kg/semaine), correspondant à une exposition élevée mais encore tolérable.

- **DHI exprimées en pourcentage de la DHT**

Pour affiner l'évaluation de l'exposition, les DHI ont également été exprimées en pourcentage (%) de la DHT (EFSA). La figure suivante en présente la répartition.

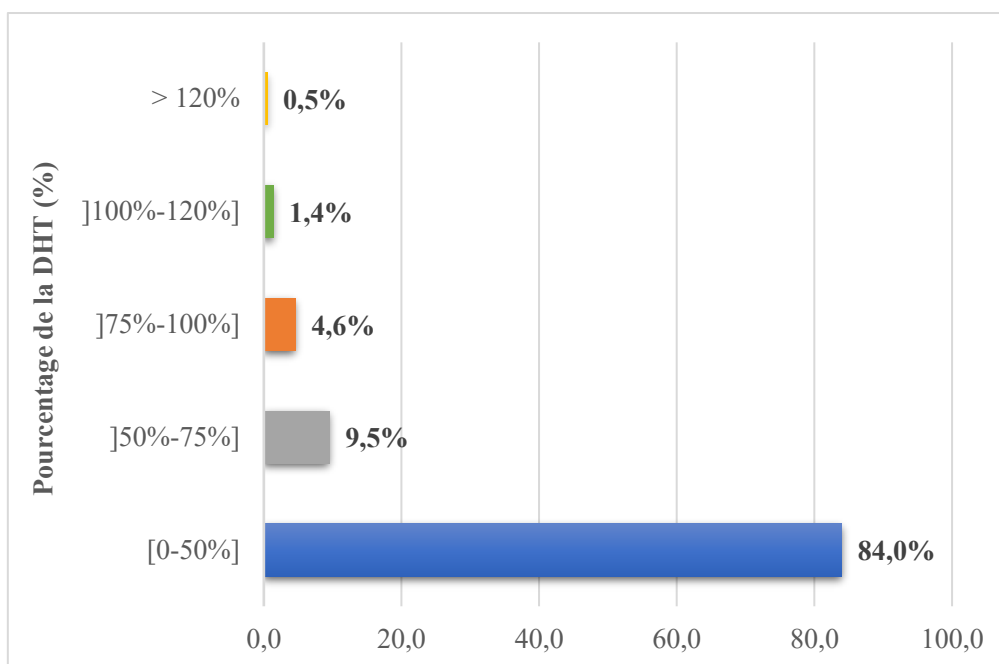


Figure 46. Répartition des DHI en pourcentage de la DHT.

- 84 % des échantillons présentent des DHI inférieures à 50 % de la DHT, indiquant une exposition faible à moyenne.
- 9,5 % des échantillons se situent entre 50 % et 75 % de la DHT.
- 4,6 % des échantillons atteignent 75 % à 100 % de la DHT.
- 1,9 % des échantillons dépassent la DHT (≥ 100 %), avec 0,5 % des échantillons au-delà de 120 %, observés principalement dans les formules à base de protéines de soja.

• Influence de l'âge et du sexe sur les DHI

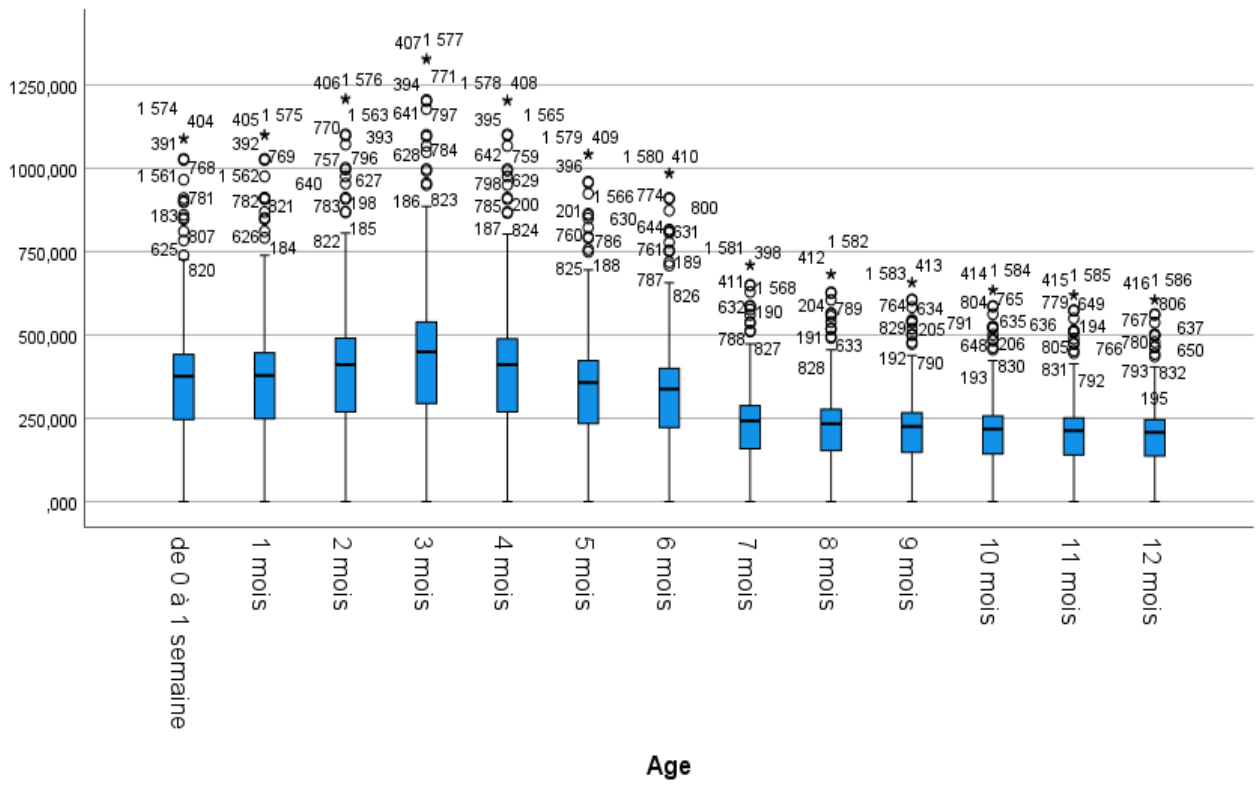


Figure 47. Evolution des DHI selon l'âge des nourrissons.

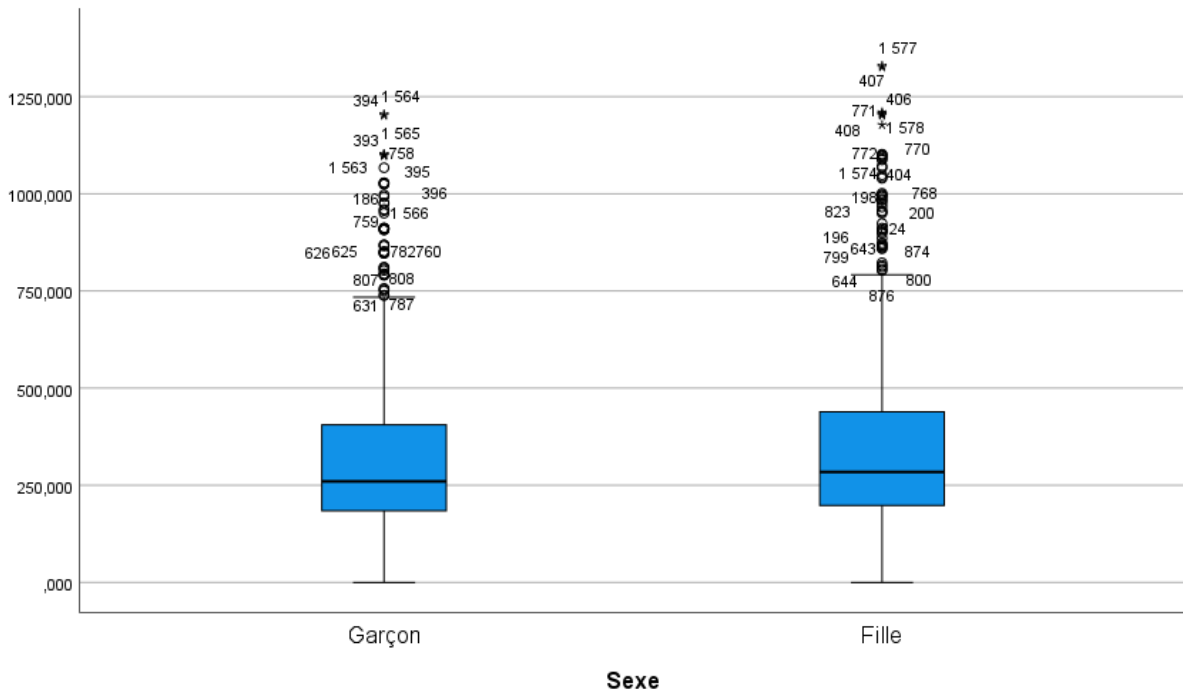


Figure 48. Répartition des DHI selon le sexe.

Les figures 47 et 48 montrent :

- Une diminution progressive des DHI avec l'âge, en lien avec l'augmentation du poids corporel et la diversification alimentaire.
- Les valeurs les plus élevées sont observées chez les nourrissons de moins de 3 mois, période où la consommation de lait est maximale par rapport au poids.
- L'effet du sexe est minime : la médiane est comparable entre garçons et filles, bien que quelques valeurs extrêmes soient plus fréquentes chez les filles.

- **Estimation des DHI issues du lait maternel**

Les DHI d'aluminium chez les nourrissons allaités au sein ont été calculées pour les six premiers mois, selon la même méthodologie que pour les PPN (cf. section Matériel et Méthodes). Les résultats, présentés selon le sexe, sont résumés ci-dessous.

Tableau 66. DHI hebdomadaires d'aluminium chez les nourrissons allaités (µg/kg/semaine)

| Age | Garçon (µg/Kg/semaine) | Fille (µg/Kg/semaine) |
|------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Naissance à 1 semaine | 86,52 | 55,06 |
| 1 mois | 92,70 | 51,92 |
| 2 mois | 75,77 | 86,52 |
| 3 mois | 101,85 | 82,07 |
| 4 mois | 68,68 | 62,80 |
| 5 mois | 126,00 | 115,92 |
| 6 mois | 79,39 | < LOQ |

- Les DHI estimées fluctuent durant les six premiers mois mais restent toutes inférieures aux seuils de sécurité DHT (1 mg/kg/semaine) et la DHTP (2 mg/kg/semaine).
- Des différences intersexes apparaissent par moment, les garçons présentant des DHI légèrement plus élevées, notamment à 5 mois.

A 6 mois, la DHI chez les filles est inférieure à la limite de quantification, reflétant une exposition extrêmement faible.

2.3. Teneurs en métaux toxiques

L'évaluation des concentrations en métaux potentiellement toxiques dans les préparations pour nourrissons (PPN) et le lait maternel a permis d'identifier la présence de plusieurs éléments, notamment le mercure (Hg), le plomb (Pb), le nickel (Ni), le titane (Ti) et le chrome (Cr). Les résultats sont présentés ci-dessous selon le type d'échantillon analysé, suivis d'une comparaison entre les deux matrices.

2.3.1. Concentrations des métaux toxiques dans les PPN

Tableau 67. Statistiques des concentrations en métaux toxiques dans les PPN (n = 61).

| Statistique | Mercure ($\mu\text{g/Kg}$) | Plomb ($\mu\text{g/Kg}$) | Nickel ($\mu\text{g/Kg}$) | Titane ($\mu\text{g/Kg}$) | Chrome ($\mu\text{g/Kg}$) |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Moyenne | 0,021 | 0,040 | 19,065 | 0,003 | 1,673 |
| Médiane | < LOQ | < LOQ | < LOQ | 0,002 | 1,619 |
| Ecart-type | 0,128 | 0,227 | 30,083 | 0,004 | 0,932 |
| Maximum | 0,925 | 1,510 | 85,250 | 0,018 | 5,105 |
| Minimum | < LOQ | < LOQ | < LOQ | < LOQ | 0,409 |
| Plage | 0,925 | 1,510 | 85,250 | 0,018 | 4,696 |

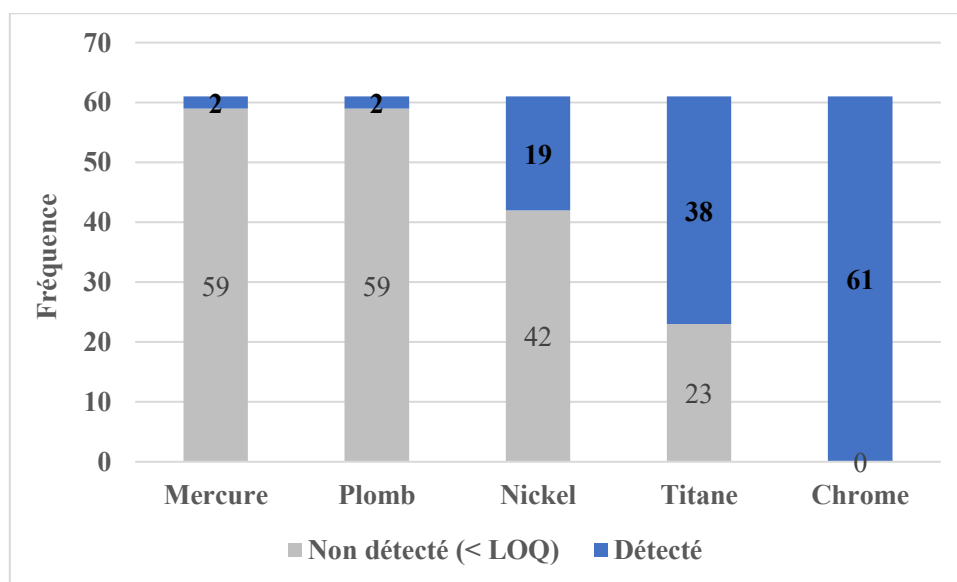


Figure 49. Fréquence de détection des métaux toxiques dans les PPN.

La Figure 49 illustre la fréquence de détection de plusieurs métaux toxiques (mercure, plomb, nickel, titane) dans les échantillons de préparations pour nourrissons analysés.

- Le mercure et le plomb n'ont été détectés que dans 2 échantillons sur 61, avec des concentrations moyennes de $0,0217 \mu\text{g/Kg}$ (Hg) et $0,0406 \mu\text{g/Kg}$ (Pb).

- Le nickel présente une grande variabilité avec une moyenne élevée de 19,065 $\mu\text{g/Kg}$; il est détecté dans 31 % des échantillons.
- Le titane est présent à de très faibles niveaux, avec une plage étroite.
- Le chrome est détecté dans 100 % des échantillons, avec une concentration moyenne de 1,673 $\mu\text{g/Kg}$.

2.3.2. Concentrations des métaux toxiques dans le lait maternel

Le Tableau 68 présente les statistiques descriptives (moyenne, écart type, minimum et maximum) des concentrations mesurées pour chaque métal.

Tableau 68. Statistiques des métaux toxiques dans le lait maternel (n = 12).

| Statistique | Nickel ($\mu\text{g/Kg}$) | Titane ($\mu\text{g/Kg}$) | Chrome ($\mu\text{g/Kg}$) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Moyenne | 5,993 | $1,692 \times 10^{-3}$ | 6,372 |
| Ecart-type | 6,334 | $2,777 \times 10^{-3}$ | 8,193 |
| Maximum | 14,167 | 0,010 | 19,836 |
| Minimum | < LOQ | < LOQ | < LOQ |

Le nickel et le chrome sont les plus présents, avec des moyennes de 5,993 $\mu\text{g/Kg}$ et 6,372 $\mu\text{g/Kg}$ respectivement, mais une forte variabilité entre les échantillons.

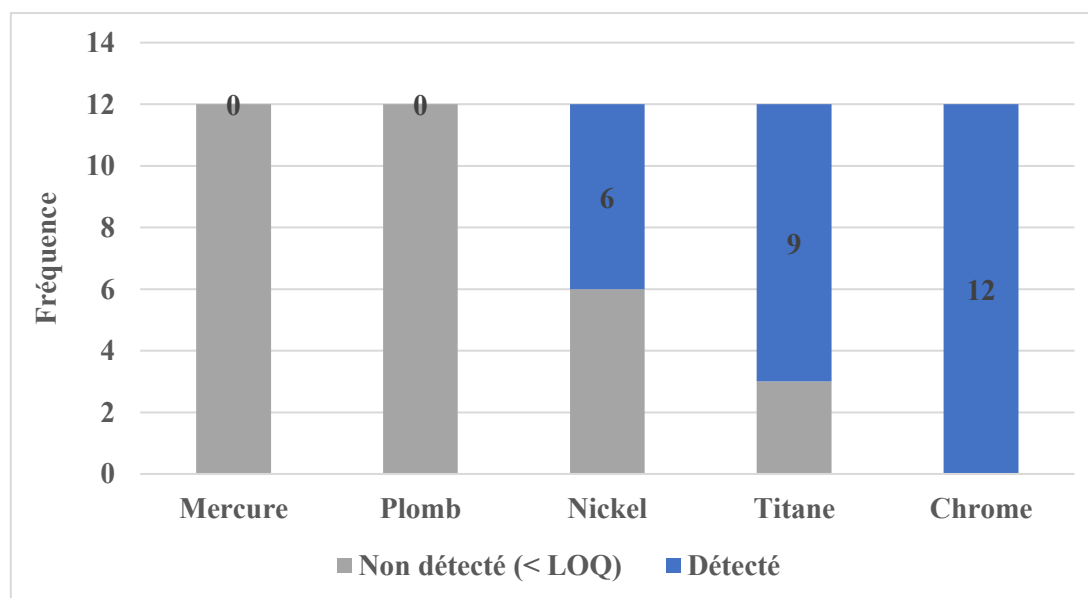


Figure 50. Fréquence de détection des métaux toxiques dans le lait maternel.

Cette figure présente la fréquence de détection de cinq métaux toxiques (Hg, Pb, Ni, Ti, Cr) dans les 12 échantillons de lait maternel analysés.

Les observations sont les suivantes :

- Mercure (Hg) et plomb (Pb) n'ont été détectés dans aucun échantillon (12/12 < LOQ).
- Le nickel (Ni) a été détecté dans 6 échantillons sur 12, soit 50 %.
- Le titane (Ti) a été quantifié dans 9 échantillons, soit 75 %.
- Le chrome (Cr) a été détecté dans l'ensemble des échantillons (12 sur 12), soit 100 % de détection.

2.3.3. Comparaison des concentrations en métaux toxiques entre le lait maternel et les PPN

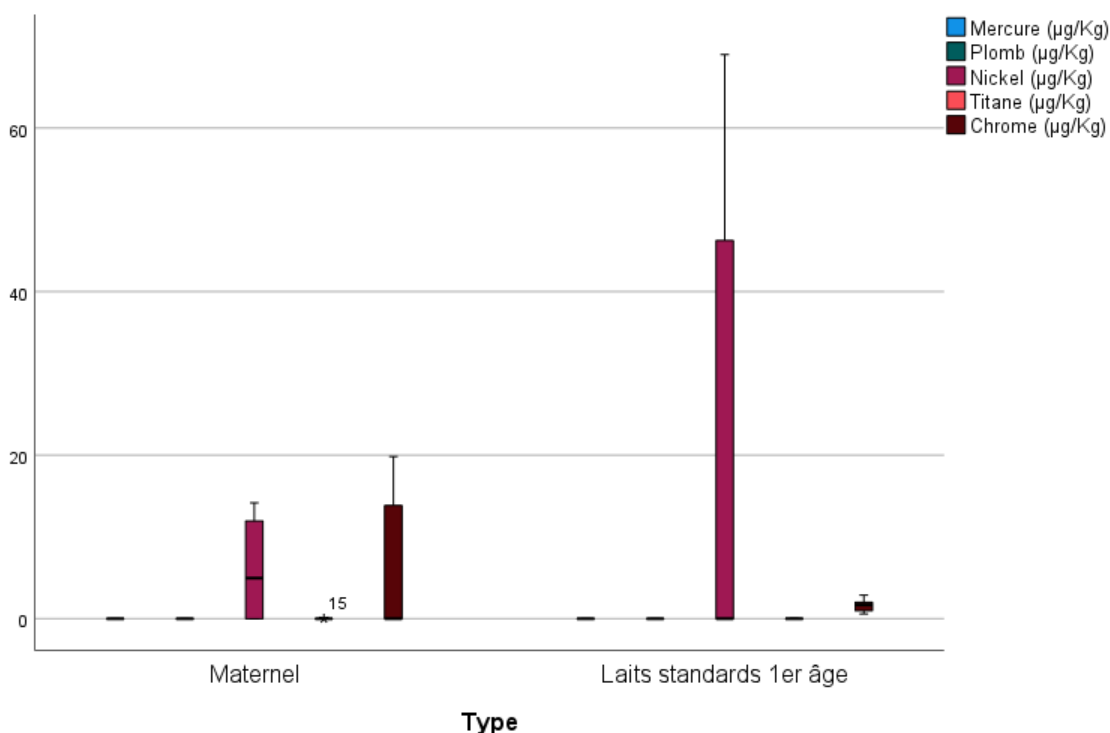


Figure 51. Comparaison des concentrations en métaux potentiellement toxiques entre le lait maternel et les laits standards 1^{er} âge.

Ce diagramme en boîte met en évidence les différences entre les deux matrices :

- Le mercure et le plomb ne sont pas détectés dans le lait maternel, et leur présence dans les PPN est très limitée.
- Le nickel est présent dans les deux types de lait, mais avec des valeurs plus élevées et variables dans les PPN.
- Le titane est détecté en faibles quantités dans les deux cas.

Le chrome est le seul métal détecté systématiquement, avec des concentrations significativement plus élevées dans les PPN.

2.3.4. Conformité des concentrations aux normes réglementaires

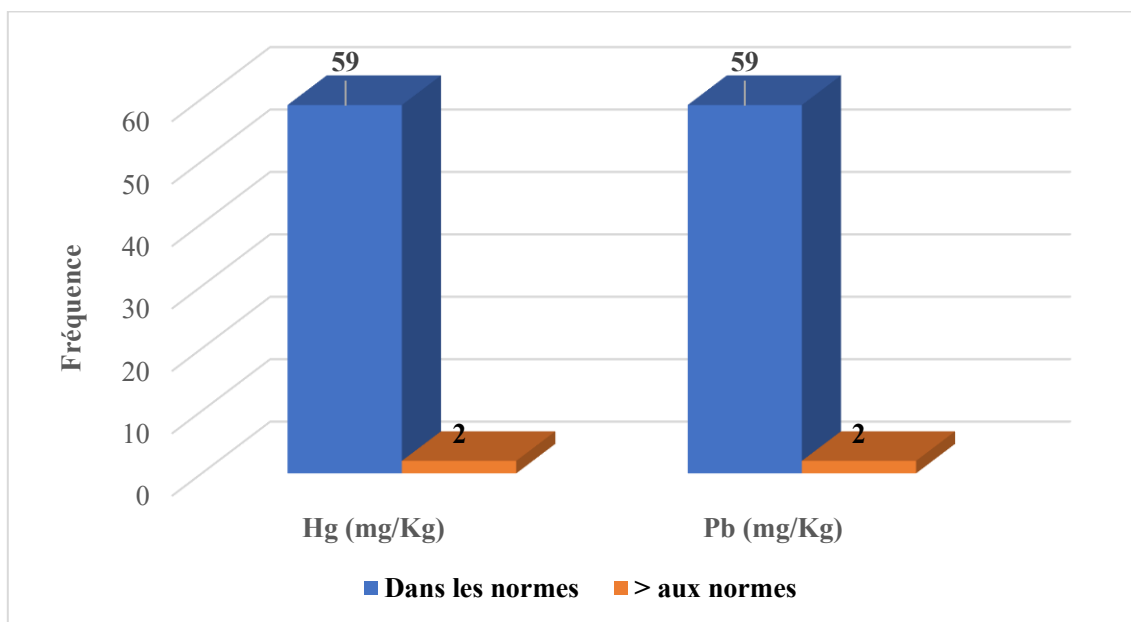


Figure 52. Conformité des concentrations en métaux lourds aux seuils réglementaires.

La figure 52 illustre la conformité des PPN par rapport aux normes de sécurité concernant le mercure et le plomb :

- **59 échantillons** respectent les limites réglementaires en vigueur.
- **2 échantillons** dépassent les seuils pour le mercure (L16 et L29), et 2 autres pour le plomb (L40 et L56).

Concernant les autres métaux :

- Aucune norme réglementaire spécifique n'est actuellement définie pour le nickel, le titane ou le chrome dans les préparations pour nourrissons, tant au niveau national qu'international.
- Ces éléments n'ont donc pas fait l'objet de comparaison aux seuils, mais leur présence, notamment celle du chrome hexavalent (Cr VI), justifie une surveillance particulière.

2.4. Teneurs en minéraux d'intérêt nutritionnel

2.4.1. Teneurs dans les PPN

Tableau 69. Statistiques des minéraux d'intérêt nutritionnel dans les PPN.

| Statistique | Cuivre (µg/100 Kcal) | Zinc (mg/100 Kcal) | Fer (µg/100 Kcal) | Manganèse (µg/100 Kcal) | Sodium (mg/100 Kcal) | Potassium (mg/100 Kcal) | Magnésium (mg/100 Kcal) |
|-------------|----------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Moyenne | 44,404 | 0,912 | 1,106 | 17,665 | 41,188 | 95,044 | 10,935 |
| Ecart-type | 15,781 | 0,508 | 0,479 | 11,763 | 8,147 | 22,114 | 2,828 |
| Maximum | 92,821 | 2,893 | 2,833 | 62,450 | 69,952 | 143,122 | 17,970 |
| Minimum | 20,306 | 0,405 | 0,500 | 4,831 | 27,744 | 40,075 | 5,295 |

Ce tableau décrit les statistiques descriptives des concentrations des principaux minéraux essentiels dans les PPN. Le potassium et le sodium présentent les valeurs les plus élevées, alors que le cuivre, le fer et le manganèse varient plus modérément selon les produits.

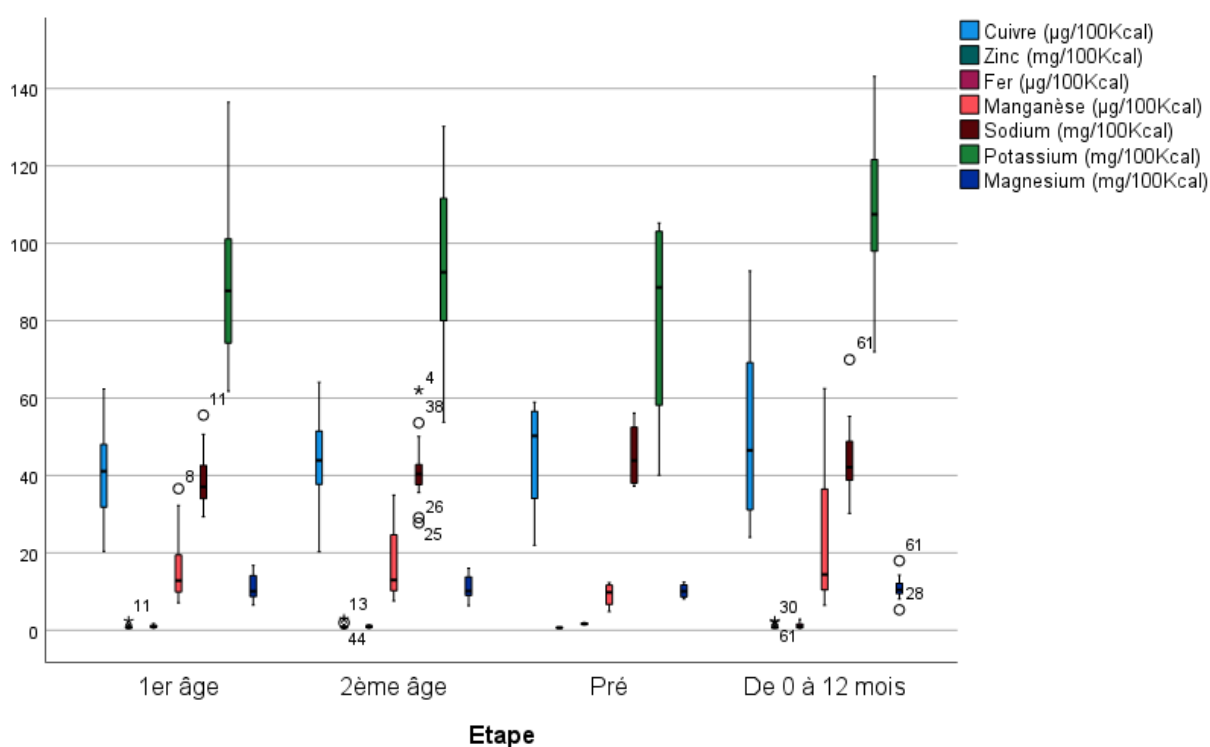


Figure 53. Concentrations des minéraux d'intérêt nutritionnel selon l'étape de PPN.

La figure 53 illustre la répartition des teneurs en minéraux selon l'étape d'alimentation. Il en ressort que :

- Le potassium et le sodium sont les minéraux les plus abondants, avec une variabilité marquée, surtout pour le potassium.
- Le cuivre et le zinc affichent des concentrations relativement stables. Cependant, les valeurs s'avèrent légèrement plus élevées dans les formules spéciales destinées aux nourrissons de 0 à 12 mois.
- Le fer et le manganèse sont plus concentrés dans les laits de 2ème âge et les formules de 0 à 12 mois.
- Le magnésium reste globalement stable, avec quelques fluctuations dans les formules de 0 à 12 mois.

2.4.2. Teneurs dans le lait maternel

Le Tableau 70 présente les statistiques descriptives de ces minéraux, exprimées en unités normalisées par 100 Kcal, conformément aux recommandations nutritionnelles pour nourrissons.

Tableau 70. Statistiques des minéraux d'intérêt nutritionnel dans le lait maternel.

| Statistique | Cuivre (µg/100 Kcal) | Zinc (mg/100 Kcal) | Fer (µg/100 Kcal) | Manganèse (µg/100 Kcal) | Sodium (mg/100 Kcal) | Potassium (mg/100 Kcal) | Magnésium (mg/100 Kcal) |
|-------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Moyenne | 36,637 | 0,740 | 0,328 | 2,218 | 23,729 | 62,896 | 5,213 |
| Ecart-type | 10,057 | 0,142 | 0,043 | 0,399 | 6,244 | 16,061 | 1,000 |
| Maximum | 50,505 | 1,015 | 0,392 | 3,157 | 34,520 | 81,162 | 7,419 |
| Minimum | 15,783 | 0,585 | 0,259 | 1,692 | 11,719 | 37,355 | 4,028 |

Le potassium est le minéral le plus présent dans le lait maternel, tandis que le fer et le manganèse affichent les concentrations les plus faibles.

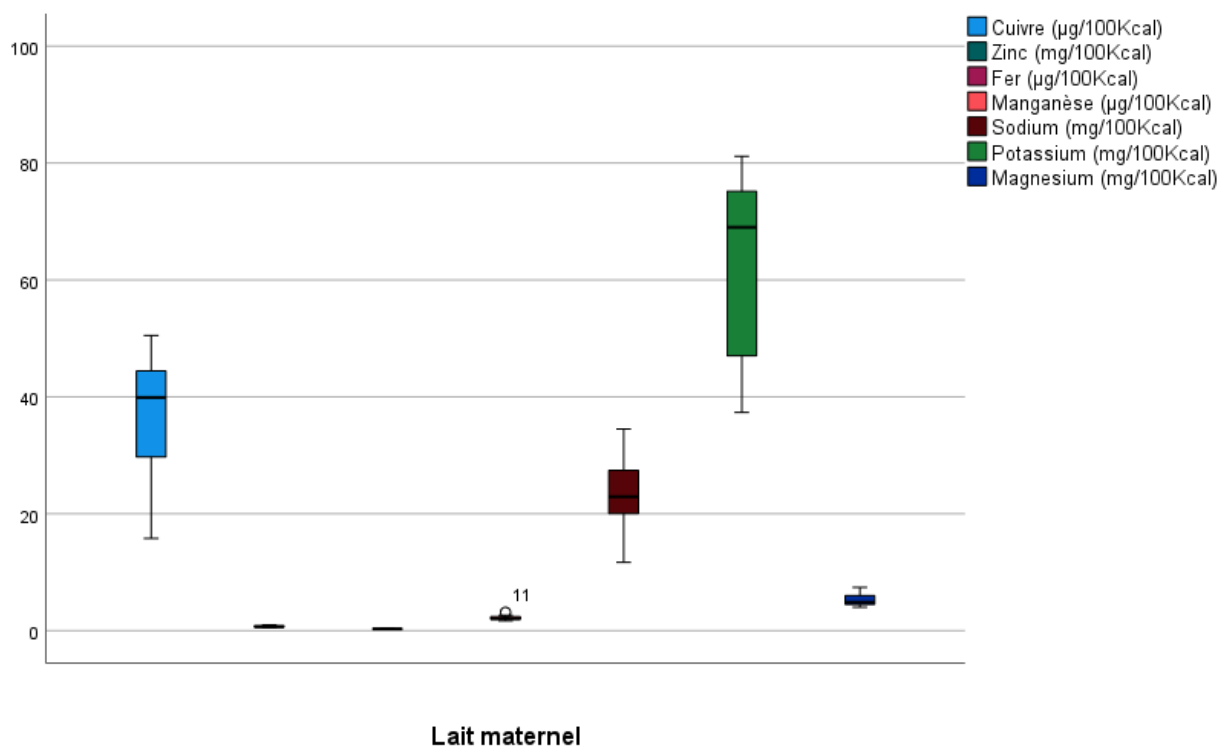


Figure 54. Teneurs en minéraux d'intérêt nutritionnel dans le lait maternel.

Cette figure illustre la distribution des concentrations des minéraux essentiels dans le lait maternel. Le potassium présente la concentration la plus élevée et la plus variable parmi les échantillons, tandis que le fer et le manganèse montrent des niveaux faibles et relativement homogènes. Le cuivre et le sodium ont une dispersion plus modérée.

2.4.3. Analyse comparative des concentrations en minéraux d'intérêt nutritionnel entre le lait maternel et les laits standards de 1^{er} âge

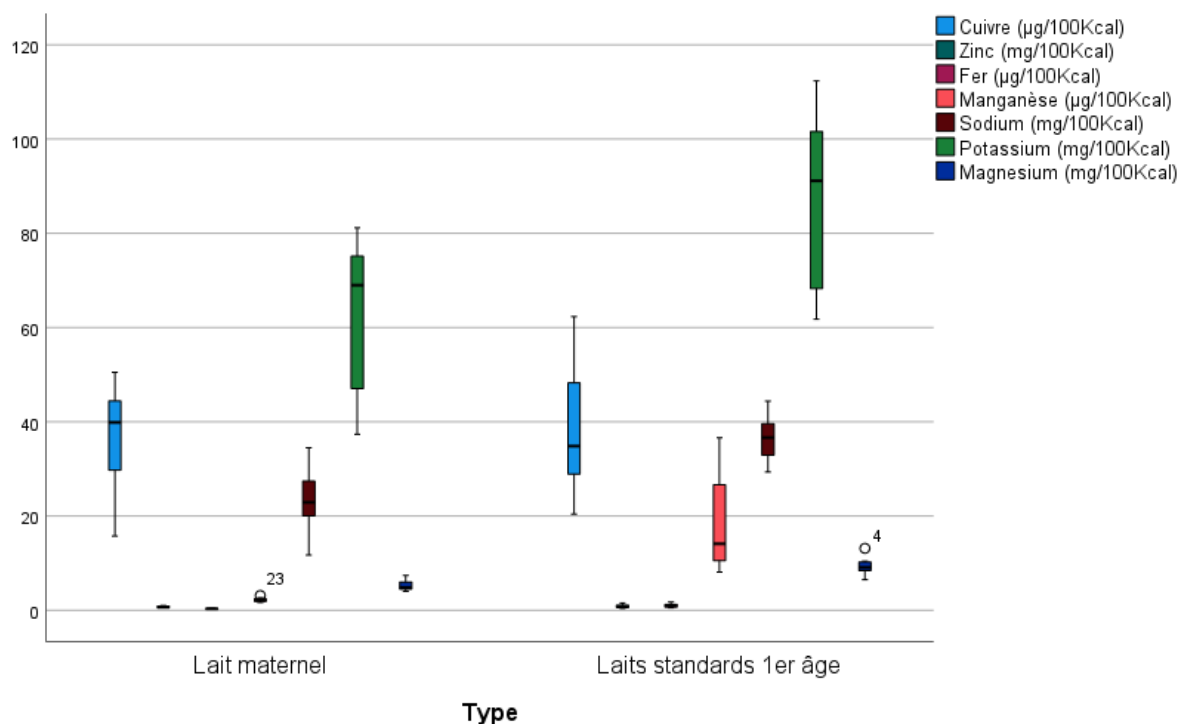


Figure 55. Comparaison des concentrations des minéraux d'intérêt nutritionnel entre le lait maternel et les préparations infantiles standards 1^{er} âge.

Le diagramme comparatif (Figure 55) met en évidence :

- Une prédominance du potassium et du sodium dans les deux types d'échantillons, avec des niveaux supérieurs dans les laits infantiles.
- Une proximité des valeurs de cuivre et de zinc entre les deux groupes.
- Des concentrations plus élevées en fer et en manganèse dans les laits standards de 1^{er} âge.

Le magnésium est présent dans des concentrations très proches entre les deux types d'échantillons, avec une légère augmentation dans les laits standards de 1^{er} âge.

2.4.4. Comparaison aux normes

Dans cette section, les concentrations en éléments minéraux essentiels mesurées dans les préparations pour nourrissons (PPN) ont été comparées aux valeurs de référence fixées par la réglementation. Cette comparaison vise à évaluer la conformité nutritionnelle des produits analysés vis-à-vis des exigences sanitaires en vigueur.

La Figure 56 illustre le niveau de conformité des différentes préparations aux normes nationales, pour chacun des éléments analysés.

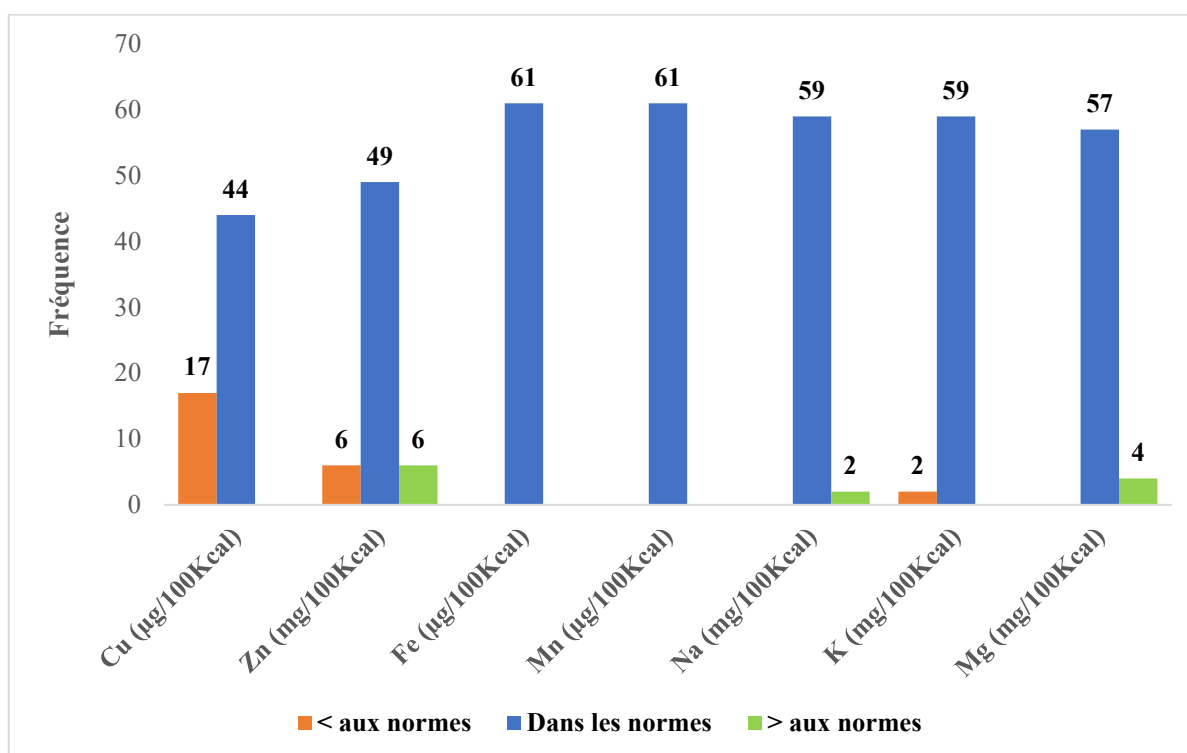


Figure 56. Conformité des concentrations en éléments essentiels dans le PPN aux normes réglementaires algériennes.

- Les niveaux de fer et de manganèse sont conformes à 100 %.
- Des non-conformités ont été observées pour le cuivre (17 échantillons sous les normes) et le zinc (6 échantillons hors norme : L11, L13, L30, L35, L45, L62).
- Le sodium et le magnésium dépassent les valeurs limites dans certains cas (L4, L61 pour Na ; L11, L36, L51, L61 pour Mg).
- Le potassium est légèrement inférieur à la norme dans deux cas (L16, L33), sans excès observé.

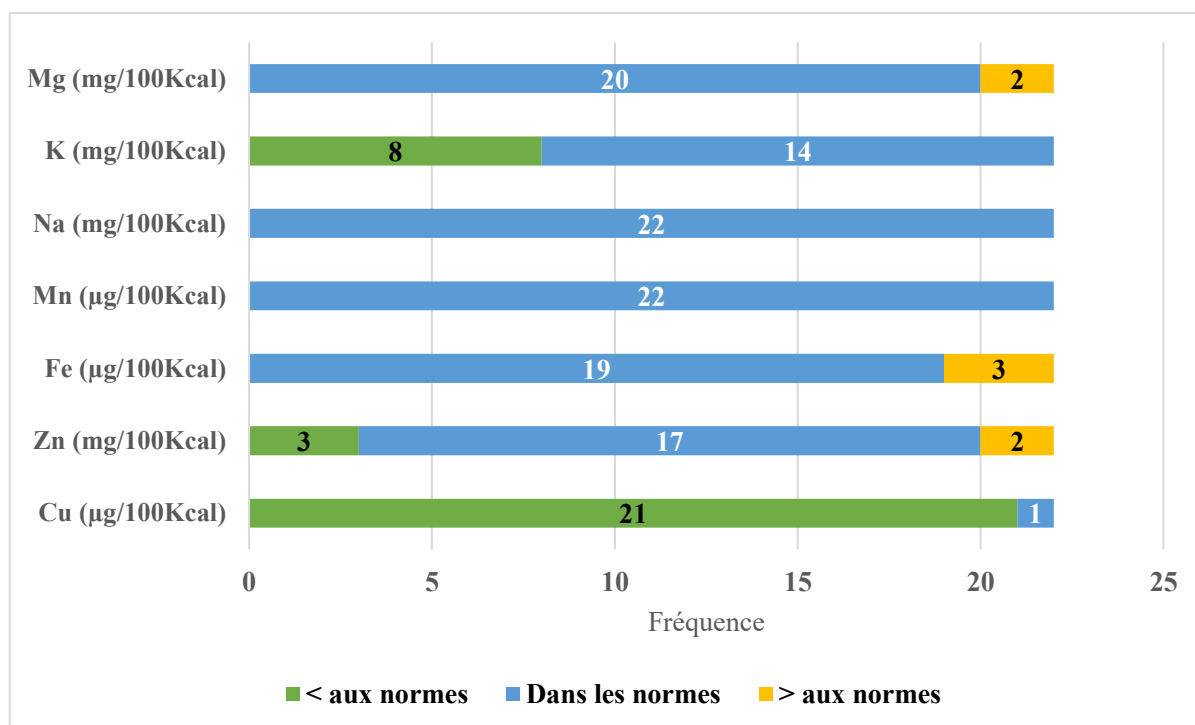


Figure 57. Conformité des concentrations en éléments essentiels dans les PPN standards de 1^{er} âge aux normes réglementaires européennes

Cette figure présente l'évaluation de la conformité des concentrations en éléments minéraux essentiels contenus dans les préparations pour nourrissons (PPN) standards de 1^{er} âge, par rapport aux normes réglementaires européennes (règlement UE n° 2016/127).

Nos résultats ont révélé que :

- Le sodium et le manganèse respectent pleinement les normes.
- Le cuivre affiche le taux de non-conformité le plus élevé (21 échantillons).
- Le zinc (3 cas) et le potassium (2 cas) sont parfois inférieurs aux seuils requis.
- Des dépassements ont été observés pour : zinc (L11, L34), fer (L8, L11, L24), sodium et magnésium (L11, L51).

La Figure 58 présente une analyse comparative des concentrations en éléments minéraux essentiels mesurées dans les laits de suite (formules de 2^{ème} âge), en les confrontant aux valeurs de référence définies par la réglementation européenne (UE n° 2016/127).

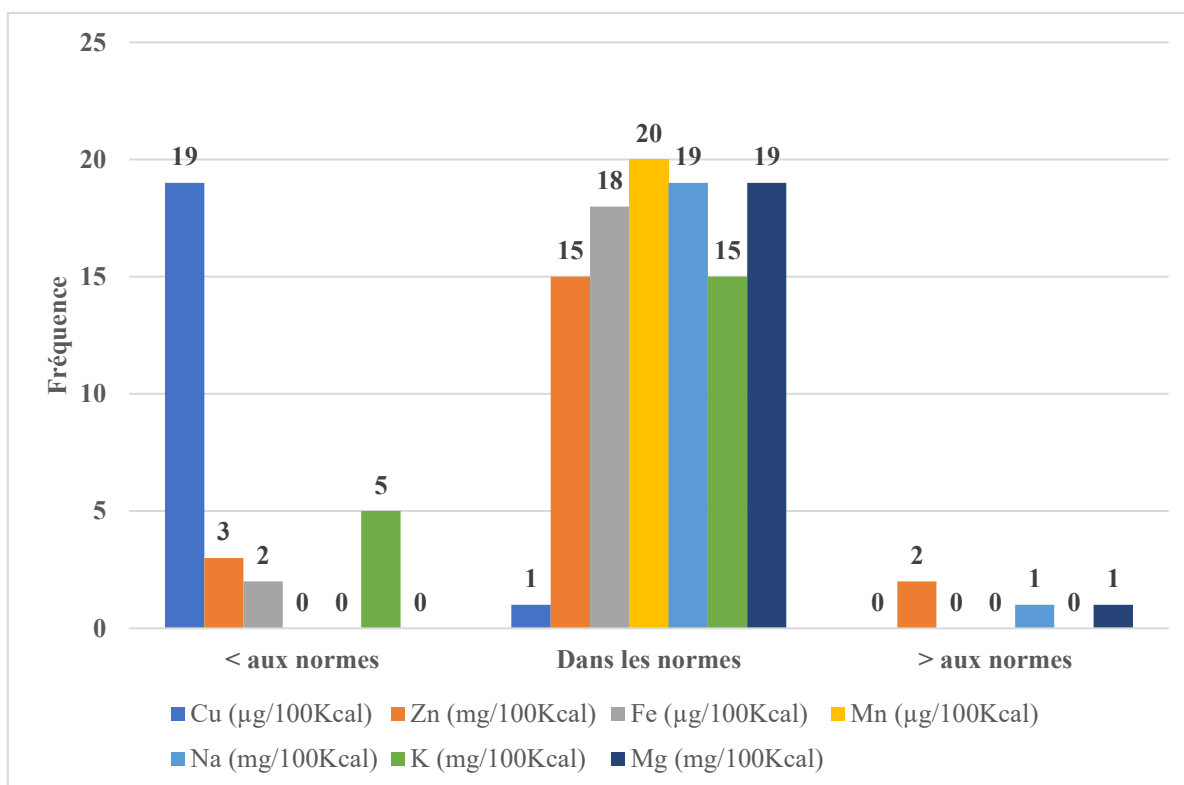


Figure 58. Analyse des concentrations en éléments essentiels dans les laits de suite par rapport aux normes européennes.

La comparaison des teneurs en éléments essentiels dans les laits de 2^{ème} âge (de suite) nous a permis de tirer les constatations suivantes :

- Cuivre conforme dans un seul cas (L56).
- Non-conformités observées pour le zinc (L48, L50, L56) et le fer (L16, L54).
- Le potassium est non conforme dans cinq cas et ont enregistré des teneurs inférieures aux limites réglementaires.
- Manganèse conforme dans 100 % des échantillons.
- Dépassement des limites pour le sodium (L4) et le magnésium (L36).

Tableau 71. Analyse des concentrations en éléments essentiels dans les PPN à base de protéines de Soja par rapport aux normes.

Le Tableau suivant présente une comparaison des teneurs en éléments minéraux essentiels dans les préparations pour nourrissons (PPN) à base de protéines de soja avec les normes nutritionnelles réglementaires

| Élément | Cu (µg/ 100Kcal) | Zn (mg/ 100Kcal) | Fe (µg/ 100Kcal) | Mn (µg/ 100Kcal) | Na (mg/ 100Kcal) | K (mg/ 100Kcal) | Mg (mg/ 100Kcal) |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| < Normes | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Conformes | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| > normes | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tous les échantillons analysés de laits à base de protéines de soja respectent les seuils minimaux requis pour l'ensemble des minéraux étudiés. Les échantillons L30 et L31 présentent toutefois des concentrations supérieures aux limites pour le zinc et le fer.

3. Discussion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une évaluation approfondie des concentrations en aluminium, métaux toxiques et éléments minéraux d'intérêt nutritionnel dans les laits infantiles destinés aux nourrissons de moins de 12 mois, ainsi que dans le lait maternel. Cette double analyse nous a permis de comparer deux sources majeures d'alimentation infantile et d'évaluer les risques potentiels liés à l'exposition aux éléments traces, notamment à l'aluminium, dans le contexte algérien.

3.1. Caractéristiques des échantillons analysés

- **Préparations pour nourrissons**

L'ensemble des préparations pour nourrissons (PPN) analysées dans cette étude provient exclusivement de l'importation, principalement de pays européens. La France domine largement l'origine des échantillons, représentant 65,57 % du total, suivie des Pays-Bas (13,11 %), de l'Allemagne (11,48 %) et de la Suisse (9,84 %). Cette dépendance de l'Algérie vis-à-vis des importations pour l'approvisionnement en laits infantiles est caractéristique de la situation actuelle du marché. Néanmoins, cette dynamique pourrait connaître une évolution significative avec le lancement d'un projet de production nationale de laits et de farines infantiles, issu d'un partenariat entre un acteur privé algérien et le Groupe Sidal. Selon le ministère de l'Industrie et de la Production pharmaceutique, l'entrée en activité de cette unité est prévue pour le second trimestre de l'année 2025, avec une capacité de production annuelle estimée à 15 000 tonnes de lait en poudre et 10 000 tonnes de farines infantiles [173].

Du point de vue de la répartition par marque ou fabricant, Biomil (produit par Fasska) constitue la part la plus importante avec 18,03 % des échantillons. Elle est suivie par Blédina (19,67 %), Nursie et France Lait (13,11 % chacune), ainsi que par Nestlé et Régilait (13,11 % également). Celia et UP International complètent l'échantillonnage avec environ 11 % des produits chacun. Cette diversité de marques sur le marché algérien illustre les efforts entrepris par les autorités sanitaires pour garantir une offre variée et adaptée aux besoins nutritionnels des nourrissons.

Afin d'évaluer de manière pertinente les variations des teneurs en aluminium et en autres métaux présents dans les différentes préparations, une classification des échantillons a été réalisée selon plusieurs critères.

Premièrement, en fonction de **l'étape d'alimentation** du nourrisson à laquelle ces formules sont destinées :

- Les laits de 1^{er} âge (0–6 mois) représentent la proportion la plus importante avec 36,07 % des échantillons.
- Ils sont suivis des laits de 2^{ème} âge (6-12 mois), qui constituent 32,79 % de l'échantillon global.
- Les formules destinées aux prématurés ou nourrissons de faible poids de naissance représentent 6,56 %.
- Enfin, les préparations couvrant une plage plus large, notamment de 0 à 12 mois, regroupent 24,59 % des échantillons, généralement formulées pour répondre à des besoins spécifiques.

Deuxièmement, selon **leur catégorie nutritionnelle ou fonctionnelle**, les préparations se répartissent ainsi :

- Les laits standards, à base de lait de vache ou de chèvre, sont majoritaires (42,62 %). Ils sont destinés aux nourrissons sans besoins particuliers et représentent les formules classiques du marché.
- Les formules pour troubles digestifs (27,87 %) ciblent des problématiques telles que la régurgitation, les coliques ou l'intolérance au lactose.
- Les formules hypoallergéniques et sans lactose, conçues pour les nourrissons présentant des allergies aux protéines du lait de vache, représentent 6,56 %.
- Les formules spéciales enrichies (16,39 %), souvent utilisées pour les nourrissons prématurés ou présentant des besoins nutritionnels accrus, complètent l'échantillonnage.
- Enfin, les formules végétales, à base de protéines de soja ou de riz, représentent également 6,56 % de l'ensemble des échantillons analysés.

Cette typologie détaillée permet une meilleure compréhension des profils nutritionnels et technologiques des préparations disponibles sur le marché, et facilite une interprétation pertinente des résultats liés à la contamination métallique et aux apports en éléments essentiels.

- **Lait maternel**

Dans le cadre de cette étude, 12 échantillons de lait maternel ont été recueillis dans le but d'évaluer les concentrations en aluminium et en autres éléments métalliques. La sélection des participantes s'est appuyée sur des critères rigoureux qui ont permis de garantir l'absence de facteurs susceptibles d'altérer la composition du lait. Ainsi, seules les mères en bonne santé, ayant connu une grossesse normale, ne suivant aucun traitement médicamenteux et ne présentant aucune habitude tabagique ont été incluses. En outre, leur résidence dans la ville d'Annaba depuis au moins trois ans a été exigée, afin de limiter l'influence de variables environnementales susceptibles d'introduire des biais liés à une exposition externe aux métaux.

Les données sociodémographiques et biologiques des mères révèlent un âge moyen de $32,75 \pm 4,13$ ans (intervalle : 27–39 ans). Les nourrissons présentaient un âge gestationnel moyen de $39,16 \pm 0,94$ semaines (extrêmes : 38 à 41 semaines), confirmant que la majorité des naissances étaient à terme. Le poids moyen à la naissance était de $3458,33 \pm 314,66$ g, avec des valeurs comprises entre 3000 et 4000 g, tandis que la taille moyenne mesurée était de $49,91 \pm 1,88$ cm (intervalle : 47–53 cm), ce qui témoigne d'un développement fœtal satisfaisant et d'un bon suivi prénatal.

Concernant le cadre de vie, 75 % des mères résidaient en milieu urbain, contre 25 % en zone semi-urbaine, ce qui reflète la distribution géographique majoritaire de la population dans les grandes agglomérations. Le niveau d'instruction des participantes était globalement élevé, avec 91,7 % des mères ayant atteint un niveau secondaire ou supérieur, contre 8,3 % ayant un niveau d'instruction moyen ou inférieur. Sur le plan professionnel, 58,3 % des mères étaient sans activité professionnelle (au foyer), tandis que 41,7 % exerçaient une fonction dans le secteur public. En termes de parité, 41,7 % étaient primipares et 58,3 % multipares.

S'agissant des nourrissons, leur âge moyen au moment du prélèvement était de $101,08 \pm 48,56$ jours (entre 15 et 180 jours), ce qui reflète une répartition variée dans la période d'allaitement tout en respectant le critère d'âge (moins de six mois). La distribution selon le sexe était parfaitement équilibrée, avec 50 % de filles et 50 % de garçons, éliminant ainsi toute influence potentielle liée au genre sur les résultats.

Enfin, l'analyse des pratiques alimentaires a révélé que 41,7 % des nourrissons étaient allaités exclusivement au sein, tandis que 58,3 % bénéficiaient d'un allaitement mixte. Il convient toutefois de préciser que, dans ce dernier cas, l'allaitement maternel prédominait, les nourrissons recevaient majoritairement du lait maternel. Cette configuration n'a pas entravé la

collecte d'échantillons suffisants, les mères ayant pu fournir la quantité de lait nécessaire pour les analyses sans difficulté.

3.2. Analyse comparative des concentrations en aluminium dans les préparations infantiles et le lait maternel

L'analyse des concentrations en aluminium dans les échantillons de préparations pour nourrissons (PPN) et de lait maternel a révélé des disparités notables entre ces deux sources d'alimentation. En moyenne, le lait maternel contenait 0,079 µg/g d'aluminium, avec des valeurs s'étendant d'un niveau inférieur à la limite de quantification (LOQ) à un maximum de 0,127 µg/g. A l'inverse, les PPN ont affiché une concentration moyenne bien plus élevée, de l'ordre de 2,645 µg/g, atteignant jusqu'à 7 µg/g dans certains échantillons.

Ces résultats sont cohérents avec les niveaux rapportés dans d'autres pays. Au Canada, les concentrations ont varié de 0,01 à 3,4 µg/g (*Dabeka et al., 2011*), tandis qu'en Nouvelle-Zélande, une valeur moyenne de 1,4 µg/g a été observée (*Stahl et al., 2018*). D'autres études, notamment au Pakistan (1,07 – 2,17 µg/g) (*Kazi et al., 2009*) et en Espagne (jusqu'à 7,9 µg/g) (*Navarro-Blasco et al., 2003*), présentent des données comparables. Toutefois, des niveaux bien plus élevés ont été signalés en Italie, atteignant jusqu'à 17 µg/g (*Plessi et al., 1997*), traduisant les différences liées aux procédés technologiques, à la réglementation et à la qualité des matières premières utilisées par les fabricants [10,231,231–234].

En ce qui concerne le lait maternel, nos résultats sont comparables à ceux obtenus par *Chao et al. (2014, Taïwan)*, qui ont trouvé une concentration moyenne de 0,036 µg/g. Toutefois, ils restent supérieurs aux niveaux observés en France en 1998, où aucune trace d'aluminium n'avait été détectée (*Biego et al., 1998*). Cette hétérogénéité peut s'expliquer par l'évolution des méthodes analytiques, aujourd'hui plus sensibles, mais aussi par des facteurs environnementaux, géographiques et alimentaires influençant l'exposition des mères [214,235].

3.2.1. Comparaison des teneurs en aluminium dans les PPN

- **Selon la marque**

L'analyse statistique des teneurs en aluminium selon les marques révèle une variabilité significative entre les fabricants (test de Kruskal-Wallis, $p = 0,013$). Les résultats du test post-hoc corrigé par Bonferroni ont montré que les marques Biomil® et Modilac® affichaient les concentrations les plus élevées, tandis que Guigoz® et Primalac® présentaient des teneurs

nettement inférieures. Ces disparités intra-marques peuvent résulter de différences dans l'origine des ingrédients, des procédés de transformation ou encore des matériaux d'emballage, susceptibles d'interagir avec la matrice laitière.

La comparaison avec les études internationales est difficile, car les marques ne sont pas toujours spécifiées, et les produits commercialisés varient selon les pays. Néanmoins, les écarts observés dans notre étude confirment l'influence du fabricant sur le niveau de contamination en aluminium.

- **Selon la classe des PPN**

L'examen des concentrations en aluminium selon les catégories technologiques des PPN a mis en évidence des différences statistiquement significatives (test de Kruskal-Wallis, $p = 0,013$). Les formules végétales, à base de soja ou de riz, se démarquent avec une concentration moyenne de $5,898 \pm 0,251 \mu\text{g/g}$. A l'opposé, les laits hypoallergéniques/sans lactose et ceux destinés aux troubles digestifs présentaient des concentrations plus basses, avec respectivement $2,354 \pm 0,641 \mu\text{g/g}$ et $2,580 \pm 0,752 \mu\text{g/g}$. Les laits standards affichaient une moyenne intermédiaire de $2,777 \pm 1,420 \mu\text{g/g}$. Les analyses post-hoc ont confirmé que les formules végétales étaient significativement plus contaminées que les autres catégories ($p < 0,05$).

Cette variabilité pourrait être expliquée par l'utilisation d'additifs contenant de l'aluminium (par exemple, les silicates ou les phosphates, utilisés comme anti-agglomérants), par la nature des matières premières végétales, connues pour leur capacité à accumuler l'aluminium en milieu acide, ou encore par les différences de traitement thermique et de formulation comme le souligne **Palmer, Gabrielle**: « *La teneur en aluminium des préparations à base de soja est 10 fois supérieure à celle des préparations à base de lait et 100 fois supérieure à celle du lait non transformé* » [236].

Plusieurs études ont déjà souligné les niveaux élevés d'aluminium dans les préparations pour nourrissons sont mentionnées dans le Tableau 72 :

Tableau 72. Teneurs en aluminium dans les PPN selon quelques études internationales

[9,10,35,231,234,235,237–239].

| Pays | Année | Concentration en Al (mg/kg) | Auteur |
|-------------|-------|-----------------------------|--------------------------|
| Nigeria | 2020 | 0,73–2,35 mg/Kg | Zelinjo N. Igweze et al. |
| Brésil | 2019 | 0,76 - 2,07 mg/Kg | Ester L et al. |
| Egypte | 2016 | 0,40 – 2,14 mg/Kg | Ahmed et al. |
| Italie | 1997 | 0,75-7,8 mg/kg | Plessi et al. |
| Pakistan | 2009 | 0,64-2,72 mg/kg | Kazi.G et al. |
| Canada | 2011 | 10–3400 ng/g | Robert Dabeka et al. |
| Royaume-Uni | 1991 | 1,5 mg/kg | Baxter et al. |
| Espagne | 2003 | 2,3 mg/kg | Navarro-Blasco et al. |
| Suède | 2011 | 0,020 mg/kg | Ljung et al. |

Nos résultats sont cohérents avec les données précédemment rapportées. *Navarro-Blasco et al. (2003)* et *Woollard et al. (1990)* ont mesuré des teneurs dépassant 600 µg/L dans les formules à base de soja ou de riz [234,240]. *Chuchu et al. (2013)* ont observé jusqu'à 5,27 µg/g dans les préparations à base de soja [241]. De même, *Paiva et al. (2019, Brésil)* ont noté une moyenne de 3,24 mg/kg, inférieure à la nôtre (5,89 mg/kg) [7]. En revanche, nos données sur les formules sans lactose (2,35 mg/kg) sont proches de celles de Paiva (2,07 mg/kg).

Les laits standards et hypoallergéniques présentent des valeurs comparables à celles rapportées par *Dabeka et al. (2011)* au Canada, *Burrell et Exley (2010, Royaume-Uni)*, ainsi que par *Redgrove et al. (2019)* au Royaume-Uni, qui ont signalé des teneurs de 1,07 µg/g dans les formules hypoallergéniques [10,242,243].

Certains auteurs ont relevé des niveaux particulièrement préoccupants : *Plessi et al. (1997)* ont trouvé jusqu'à 13 mg/kg dans certaines formules italiennes [231].

Enfin, les risques pour la santé sont bien documentés. *Freundlich et al. (1985)* ont décrit des cas d'insuffisance rénale chez des nourrissons nourris avec le « Similac PM 60/40 », riche en aluminium. L'Académie américaine de pédiatrie recommande ainsi de limiter au maximum l'exposition des nourrissons à l'aluminium et suggère une révision des doses hebdomadaires tolérables (DHT) pour cette population vulnérable [244].

3.2.2. Comparaison des concentrations en aluminium entre le lait maternel et les préparations infantiles standards de 1^{er} âge

L'analyse comparative des concentrations en aluminium dans le lait maternel et les préparations pour nourrissons (PPN) standards de 1^{er} âge a mis en évidence une différence statistiquement significative entre les deux types d'alimentation. Le test t de Student appliqué aux deux groupes a révélé une différence moyenne de 2,75 µg/g en faveur des préparations infantiles ($p < 0,001$), indiquant une teneur en aluminium notablement plus élevée dans ces dernières.

Ces résultats sont en cohérence avec plusieurs études antérieures ayant documenté une exposition accrue à l'aluminium chez les nourrissons alimentés au lait infantile. *Weintraub et al. (1986)* en Australie, ainsi que *Fernandez-Lorenzo et al. (1999)* en Espagne, ont montré que les préparations industrielles contenaient en moyenne 225,8 µg/L d'aluminium, contre seulement 23,9 µg/L pour le lait maternel [12,245]. De même, *Baxter et al. (1991)* au Royaume-Uni et *Chao et al. (2014)* à Taïwan ont confirmé une contamination plus importante des formules infantiles, bien que les niveaux exacts varient en fonction de la formulation, des ingrédients et des méthodes analytiques utilisées [9,214]. Les valeurs rapportées par *Thorsten Stahl et al. (2018)*, situées entre 2,4 et 4,3 µg/g dans les préparations en poudre, s'inscrivent dans la même fourchette que celles observées dans notre étude [232]. Les différences entre le lait maternel et les PPN peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs : l'utilisation de matières premières contenant naturellement de l'aluminium, l'ajout d'additifs technologiques, le traitement thermique, ainsi que la migration depuis les matériaux d'emballage ou les équipements de production. Par ailleurs, l'amélioration de la sensibilité des techniques de détection (telles que l'ICP-MS) permet aujourd'hui de quantifier avec plus de précision les faibles teneurs en éléments traces, ce qui pourrait expliquer certaines divergences avec les anciennes publications.

La robustesse de la différence observée est renforcée par une taille d'effet importante (d de Cohen = 0,885), soulignant que l'écart n'est pas seulement statistiquement significatif, mais

également pertinent d'un point de vue sanitaire. Ce constat corrobore les recommandations internationales en faveur de l'allaitement maternel exclusif durant les premiers mois de vie, non seulement pour ses bénéfices nutritionnels et immunologiques, mais aussi comme moyen de réduire l'exposition des nourrissons à des contaminants environnementaux tels que l'aluminium. Par conséquent, ces résultats justifient la nécessité d'un contrôle rigoureux de la contamination métallique dans les laits infantiles et appellent à la révision des normes de sécurité pour les populations les plus vulnérables.

3.2.3. Comparaison des concentrations en aluminium selon l'étape d'alimentation des préparations pour nourrissons

L'évaluation statistique des concentrations en aluminium dans les préparations pour nourrissons, réparties selon les étapes d'alimentation, n'a révélé aucune différence significative entre les groupes ($p = 0,286$; test de Welch). Bien que la concentration moyenne la plus élevée ait été observée dans le groupe « 0 à 12 mois » (3,27 $\mu\text{g/g}$), et la plus faible dans les formules « Pré » destinées aux prématurés (2,15 $\mu\text{g/g}$), ces écarts ne permettent pas de conclure à une différence significative entre les étapes. Cette absence de distinction pourrait s'expliquer, d'une part, par une variabilité intra-groupe relativement importante, comme le montre l'écart-type élevé, et d'autre part, par une taille d'échantillon réduite dans certaines catégories, notamment celle des laits « Pré » ($n = 4$), limitant ainsi la puissance statistique de la comparaison.

Ces résultats concordent avec ceux rapportés dans la littérature, où la distribution de l'aluminium dans les préparations infantiles ne semble pas directement corrélée à l'étape d'alimentation. *Baxter et al. (1991)* au Royaume-Uni, ainsi que *Weintraub et al. (1986)* en Australie, ont rapporté une homogénéité relative des concentrations d'aluminium entre les laits de 1er et de 27^{ème} âge, sans tendance marquée liée à l'âge ciblé par la formule [9,245]. Toutefois, certaines études ont documenté des niveaux plus élevés dans les préparations destinées aux nourrissons prématurés ou de faible poids. Par exemple, *Navarro-Blasco et al. (2003)* ont observé, en Espagne, des concentrations allant de 49,9 à 249,4 $\mu\text{g/L}$ dans ce type de formules [234]. De telles divergences pourraient découler de facteurs tels que la composition spécifique des formules enrichies, le recours à des additifs minéraux, ou encore les différences dans les procédés industriels et les matériaux d'emballage utilisés.

Weintraub et al. (1986) ont d'ailleurs relevé une large plage de contamination en aluminium dans des formules provenant de divers pays, allant de 85 à 5000 $\mu\text{g/L}$, illustrant ainsi la

variabilité liée à la source de production et aux conditions de transformation des laits infantiles [245]. Cette hétérogénéité indique que l'exposition à l'aluminium des nourrissons n'est pas exclusivement liée à l'étape d'alimentation, mais plutôt aux ingrédients spécifiques de la formule, à l'origine des matières premières, ainsi qu'aux technologies de fabrication mises en œuvre.

3.2.4. Comparaison des concentrations en aluminium selon le fabricant

L'analyse comparative des concentrations en aluminium selon les fabricants de préparations pour nourrissons a mis en évidence des différences statistiquement significatives ($p = 0,038$; test de Kruskal-Wallis), suggérant une influence notable des procédés technologiques, de l'origine des matières premières, ainsi que des pratiques industrielles propres à chaque marque. Dans notre étude, les niveaux les plus élevés d'aluminium ont été enregistrés dans les formules produites par Hochdorf Swiss, suivies de celles fabriquées par Fasska. En revanche, les produits de Nestlé et Blédina ont présenté des concentrations plus faibles et relativement homogènes.

Ces disparités s'inscrivent dans la continuité des observations rapportées par *Weintraub et al. (1986)*, qui ont documenté des niveaux d'aluminium très variables selon les marques commerciales en Australie, avec certaines formulations dépassant les seuils jugés acceptables pour l'alimentation infantile [245]. De manière similaire, *Plessi et al. (1997)*, dans une étude menée en Italie, ont relevé des concentrations excédant les recommandations, notamment dans les produits de certaines marques industrielles européennes [231]. En revanche, notre constat diverge de celui de *Navarro-Blasco et al. (2003)*, qui ont rapporté une répartition plus homogène de l'aluminium entre les différents fabricants espagnols, ce qui suggère une meilleure harmonisation des pratiques de production ou un contrôle plus strict des sources de contamination dans le contexte de leur étude [234]. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces écarts entre fabricants. D'abord, la composition des formules, qui inclue la nature des protéines (lait de vache, de soja ou de riz), les minéraux ajoutés, ou encore la présence d'additifs technologiques (agents anti-agglomérants) peut jouer un rôle direct sur la teneur en aluminium. Ensuite, les procédés de transformation (séchage par atomisation, chauffage, homogénéisation) ainsi que le contact avec des équipements métalliques au cours de la chaîne de production peuvent être des sources potentielles de migration de l'aluminium vers le produit final. Enfin, la qualité de l'eau utilisée dans la préparation des poudres infantiles pourrait également contribuer à la contamination, notamment si cette dernière provient de réseaux publics où la présence naturelle d'aluminium n'est pas strictement contrôlée.

Ces résultats soulignent ainsi l'importance d'une réglementation renforcée et d'un suivi rigoureux des pratiques industrielles à toutes les étapes de la fabrication des laits infantiles. La traçabilité et la standardisation des procédés sont cruciales pour harmoniser la qualité entre fabricants et assurer la sécurité des produits destinés à l'alimentation du nourrisson.

3.2.5. Estimation des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) d'aluminium chez les nourrissons nourris aux PPN

L'analyse des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) en aluminium à partir des préparations pour nourrissons (PPN) a permis d'évaluer le niveau d'exposition des nourrissons à ce contaminant en lien avec les normes internationales. Nos résultats indiquent que la majorité des DHI estimées restent inférieures à la Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) définie par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA), fixée à 1 mg/kg de poids corporel/semaine, avec seulement 1,9 % des échantillons dépassant ce seuil. Toutefois, aucune valeur ne dépasse la Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire (DHTP) de 2 mg/kg/semaine, recommandée par le JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives).

Ces constats rejoignent les observations rapportées dans la littérature, notamment au Canada et en Espagne, où l'exposition à l'aluminium via les laits infantiles, en particulier les formules spécialisées ou d'origine végétale, a été identifiée comme préoccupante pour la santé infantile (*Navarro-Blasco et al., 2003 ; Dabeka et al., 2011*) [10,234]. Dans l'étude de *Stahl et al. (2018)*, les DHI issues des formules infantiles à base de soja variaient entre 0,10 et 0,78 mg/kg/semaine, représentant jusqu'à 78 % de la DHT, ce qui concorde avec les niveaux relevés dans notre étude [246].

L'exposition plus importante observée dans les formules végétales, notamment celles à base de soja ou de riz, a déjà été largement documentée. *Woollard et al. (1990)* et *Navarro-Blasco et al. (2003)* ont rapporté des concentrations 10 à 20 fois supérieures à celles des formules standards dans les laits à base de soja, principalement en raison de l'accumulation naturelle d'aluminium dans les plantes cultivées sur sols acides [234,240].

Par ailleurs, l'analyse selon l'âge des nourrissons a montré une exposition plus marquée durant les trois premiers mois de vie, période durant laquelle les besoins nutritionnels sont les plus élevés rapportés au poids corporel. Ces résultats corroborent ceux de *Kazi et al. (2009)*, qui ont souligné que les nouveau-nés et les nourrissons jeunes sont particulièrement vulnérables aux contaminants alimentaires, en raison d'une immaturité des barrières physiologiques (barrière

intestinale et hématoencéphalique) et d'un système d'élimination encore en développement [233]. En effet, la barrière hématoencéphalique, en cours de maturation durant la première année de vie, permet une perméabilité accrue aux substances toxiques, tandis que le métabolisme hépatique et rénal reste limité. Ce dernier, favorise la rétention d'aluminium dans l'organisme.

Il convient également de considérer l'exposition cumulée à l'aluminium chez les nourrissons. En plus des PPN, d'autres vecteurs d'exposition existent, tels que l'eau de reconstitution des biberons, susceptible de contenir de l'aluminium selon sa qualité, ainsi que les vaccins administrés dès les premières semaines de vie. Plusieurs études ont en effet rapporté la présence d'adjuvants aluminiques dans les vaccins infantiles, ce qui pourrait contribuer à l'augmentation de la charge corporelle totale en aluminium chez les nourrissons (*Bigham et Copes, 2005 ; Mitkus et al., 2011*) [67,77].

Enfin, l'analyse des DHI en fonction du sexe n'a révélé aucune différence significative entre les garçons et les filles, ce qui suggère que le facteur déterminant principal de l'exposition est l'âge, notamment les premiers mois de vie.

Ces observations renforcent la nécessité d'une vigilance accrue quant à la formulation des laits infantiles, particulièrement ceux à base de plantes, et plaident en faveur d'un renforcement des contrôles réglementaires visant à limiter l'exposition des nourrissons à l'aluminium, conformément aux recommandations des organisations internationales de santé.

3.2.6. Estimation des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) d'aluminium chez les nourrissons allaités au sein

L'analyse des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) en aluminium chez les nourrissons allaités au sein entre la naissance et l'âge de six mois met en évidence une exposition modérée, avec des valeurs généralement inférieures à celles observées dans les préparations pour nourrissons (PPN). Cette constatation souligne le rôle protecteur du lait maternel vis-à-vis de l'exposition aux contaminants environnementaux, et notamment aux métaux traces comme l'aluminium.

Les résultats révèlent néanmoins des variations notables des DHI en fonction de l'âge, avec des valeurs maximales atteintes vers le cinquième mois, soit 126,00 µg/kg/semaine chez les garçons et 115,92 µg/kg/semaine chez les filles. Cette augmentation pourrait être expliquée par l'élévation des besoins nutritionnels et la quantité de lait ingérée à cet âge, mais également par des facteurs environnementaux influant sur la concentration d'aluminium dans le lait maternel,

comme l'alimentation maternelle, l'utilisation de certains ustensiles domestiques ou encore l'exposition professionnelle ou résidentielle à des sources d'aluminium.

Nos résultats s'inscrivent en cohérence avec les travaux de *Chao et al. (2014)* à Taïwan, qui ont montré une diminution progressive des concentrations d'aluminium au cours de la lactation, les valeurs les plus élevées étant observées au début de l'allaitement, probablement en lien avec des transferts plus actifs de certains éléments durant le colostrum. *Biego et al. (1998)* en France ont également constaté des concentrations faibles, voire indétectables, dans des échantillons de lait maternel collectés au cours des premières semaines de vie [214,235].

Il est toutefois essentiel de noter que les DHI estimées ici concernent uniquement l'exposition via le lait maternel, à l'exclusion des autres sources potentielles telles que l'eau potable, les aliments complémentaires (à partir de six mois), ou encore les adjuvants vaccinaux contenant de l'aluminium, administrés dans le cadre du calendrier vaccinal pédiatrique. Ces sources peuvent, selon les contextes, représenter une part non négligeable de l'exposition globale.

La faible teneur en aluminium du lait maternel, observée de manière constante dans notre étude comme dans la littérature, confirme l'intérêt majeur de promouvoir l'allaitement maternel exclusif pendant les six premiers mois, conformément aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Au-delà de ses bénéfices nutritionnels et immunologiques bien établis, l'allaitement exclusif contribue ainsi à limiter l'exposition précoce aux contaminants chimiques, dont les effets à long terme sur le développement neurologique et rénal des nourrissons restent préoccupants.

3.3. Analyse comparative des métaux toxiques dans les préparations pour nourrissons et le lait maternel

L'analyse des concentrations en métaux potentiellement toxiques dans les préparations pour nourrissons (PPN) et dans le lait maternel révèle des disparités notables selon les éléments étudiés. Nos résultats mettent en évidence une présence systématique du chrome (Cr) dans l'ensemble des échantillons de PPN, ainsi qu'une variabilité importante des concentrations en nickel (Ni). En revanche, le mercure (Hg) et le plomb (Pb) ne sont détectés que de manière sporadique.

Le chrome a été identifié dans 100 % des préparations analysées, avec une concentration moyenne de 1,673 µg/kg. Sa détection dans une moindre mesure dans le lait maternel suggère

une contamination d'origine environnementale ou liée à l'alimentation maternelle. Ces résultats sont en concordance avec ceux rapportés par *Paiva et al. (2023)*, qui ont souligné des niveaux élevés de chrome, notamment dans les produits à base de riz, fréquemment utilisés dans certaines formules infantiles spécialisées [219].

Concernant le nickel, une variabilité marquée a été observée dans les PPN, avec des concentrations atteignant jusqu'à 85,25 µg/kg. Cette variabilité pourrait être attribuée à la nature des ingrédients, à l'eau ou à l'équipement industriel utilisés. Ce constat rejoint les résultats d'*Elaridi et al. (2020)*, qui ont rapporté des niveaux de nickel similaires dans des laits infantiles commercialisés au Liban [247].

Le nickel a également été détecté dans le lait maternel, bien que les concentrations soient généralement plus faibles. Cela reste cohérent avec la revue de la littérature de *Rebello et Caldas (2020)*, qui ont mis en évidence la présence de ce métal dans le lait humain, en lien avec l'exposition environnementale des mères [248].

Le titane (Ti), quant à lui, a été détecté à de très faibles concentrations dans les deux types d'échantillons. Cette observation corrobore les travaux de *Ljung et al. (2011)*, qui ont rapporté des traces de titane dans certaines formules enrichies pour nourrissons, probablement liées à des additifs technologiques ou à la contamination croisée durant le processus de fabrication [239].

En ce qui concerne le mercure (Hg) et le plomb (Pb), seuls deux échantillons sur 61 présentaient des niveaux détectables, avec des moyennes respectives de 0,0406 µg/kg pour le mercure et de 0,0217 µg/kg pour le plomb. Bien que ces concentrations demeurent faibles, leur présence indique une contamination ponctuelle. Ces résultats sont cohérents avec les données d'*Abu-Shaala et al. (2022)*, qui ont observé une faible fréquence de contamination au mercure dans les préparations pour nourrissons, mais une proportion plus élevée de contamination au plomb, atteignant 38 % des échantillons analysés [213].

Enfin, s'agissant de l'exposition des nourrissons au plomb via l'allaitement maternel, la revue systématique de *Koyashiki et al. (2010)* rapporte des niveaux de plomb extrêmement variables dans le lait humain, allant de 0,11 à 791 µg/L. Cette large fourchette illustre l'influence des conditions environnementales, du mode de vie, ainsi que des caractéristiques individuelles des mères sur la composition du lait maternel [249].

Ainsi, bien que les niveaux de contamination observés dans notre étude soient globalement faibles pour la majorité des métaux toxiques, leur présence, même à l'état de traces, justifie la nécessité d'un suivi régulier et rigoureux des produits destinés à la nutrition infantile, en particulier dans un contexte de vulnérabilité biologique accrue des nourrissons.

- **Comparaison aux normes de sécurité et interprétation contextuelle des teneurs en métaux toxiques**

L'analyse comparative des concentrations en métaux toxiques dans les échantillons de préparations pour nourrissons (PPN) met en évidence une conformité globale satisfaisante vis-à-vis des normes de sécurité sanitaire. En effet, 98 % des échantillons analysés respectent les seuils réglementaires en vigueur pour le plomb (Pb) et le mercure (Hg), ce qui corrobore les données rapportées par *Paiva et al. (2023)* et *Elaridi et al. (2020)*, qui ont également observé une conformité majoritaire aux limites réglementaires dans leurs études respectives sur les laits infantiles en Amérique du Sud et au Liban [219,247].

Cependant, deux échantillons de notre étude ont présenté des dépassements notables des limites autorisées pour ces deux métaux. La concentration maximale de plomb détectée (1,51 mg/kg) excède largement le seuil réglementaire, généralement fixé à < 0,01 mg/kg pour les aliments destinés aux nourrissons. Ce niveau est comparable à celui rapporté par *Fernandez-Lorenzo et al. (1999)* dans certaines préparations espagnoles, où le plomb atteignait 1149 µg/L (1,149 mg/L) [12].

Nos résultats montrent également des teneurs supérieures à celles observées dans plusieurs pays en développement, tels que :

- Le Pakistan, où *Kazi et al. (2009)* ont détecté des concentrations de plomb comprises entre 28,7 et 119 µg/kg [233].
- Le Liban, où *Elaridi et al. (2020)* ont rapporté une contamination dans 4 % des échantillons, avec une moyenne de 371 µg/kg [247].

Concernant le mercure (Hg), la concentration la plus élevée observée dans nos échantillons atteint 0,92 mg/kg, ce qui dépasse également les seuils tolérables pour les nourrissons. Bien que cette présence reste occasionnelle, elle rejoint les constats de *Abu-Shaala et al. (2022)*, qui ont signalé des traces de mercure dans certaines formules pour nourrissons à des niveaux généralement inférieurs aux limites maximales [213].

Ces niveaux, bien que préoccupants pour certains échantillons, restent néanmoins généralement inférieurs à ceux rapportés dans des pays où la réglementation est moins stricte.

- **Facteurs influençant les niveaux de contamination**

Les différences observées dans les concentrations des métaux toxiques entre les échantillons peuvent être attribuées à plusieurs facteurs liés à la fabrication et à l'origine des matières premières. *Paiva et al. (2023)* ont souligné que les produits à base de riz sont particulièrement susceptibles de contenir des taux élevés de chrome (Cr) et d'arsenic, en raison de la capacité de cette plante à bioaccumuler ces éléments [219].

De plus, *Elaridi et al. (2020)* ont montré que le type d'emballage (aluminium vs métallique) n'a pas d'influence significative sur les niveaux de métaux, ce qui suggère que la contamination provient plutôt des ingrédients eux-mêmes que du conditionnement final [247].

Enfin, les travaux de *Ljung et al. (2011)* ont révélé que les formules hypoallergéniques et à base de soja contiennent fréquemment des niveaux plus élevés de certains métaux, notamment l'aluminium, le cuivre et le chrome, ce qui pourrait expliquer les teneurs plus importantes en nickel (Ni) et en chrome observées dans nos échantillons issus de ces catégories spécifiques [239].

- **Comparaison entre lait maternel et préparations pour nourrissons**

L'analyse comparative entre le lait maternel et les préparations infantiles montre clairement que le lait maternel contient des niveaux de métaux toxiques nettement plus faibles, ce qui corrobore les observations de *Rebelo et Caldas (2020)* et *Fernandez-Lorenzo et al. (1999)* [12,248].

Ces auteurs ont montré que le lait maternel est généralement moins contaminé par le plomb, le cadmium ou l'arsenic que les produits de substitution industriels.

Néanmoins, certains éléments comme le chrome et le nickel ont été détectés de manière récurrente dans le lait maternel, probablement en raison de l'exposition environnementale des mères. Dans notre étude, les concentrations de nickel variaient entre < LOQ et 14,17 µg/kg, ce qui est en accord avec les valeurs rapportées par *Paiva et al. (2023)* et *Rebelo et Caldas (2020)* [219,248]

De même, le chrome a été détecté dans 100 % des échantillons de lait maternel, confirmant les résultats de *Elaridi et al. (2020)* et *Fernandez-Lorenzo et al. (1999)*, qui ont également mis en évidence une contamination environnementale probable [12,247].

L'ensemble de ces résultats souligne la nécessité d'un encadrement réglementaire plus rigoureux, en particulier pour des éléments tels que le nickel et le chrome, qui ne font actuellement pas l'objet de seuils réglementaires clairement définis pour les nourrissons, malgré leur présence significative dans certaines formules. L'évaluation continue des niveaux de métaux toxiques dans l'alimentation lactée reste donc une priorité en santé publique infantile.

3.4. Teneurs en minéraux d'intérêt nutritionnel

L'évaluation des concentrations en éléments essentiels dans les préparations pour nourrissons (PPN) et le lait maternel a permis d'établir une comparaison des apports nutritionnels issus de ces deux sources. L'objectif était d'identifier d'éventuels écarts par rapport aux recommandations nutritionnelles, en tenant compte de la biodisponibilité et des besoins physiologiques spécifiques des nourrissons. Les résultats obtenus indiquent que le potassium (K) et le sodium (Na) sont les minéraux les plus abondants, tandis que des éléments tels que le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) présentent une variabilité notable selon les échantillons.

- **Cuivre (Cu)**

Les concentrations moyennes mesurées étaient de 44,4 µg/100 Kcal dans les PPN contre 36,6 µg/100 Kcal dans le lait maternel. Ces résultats sont comparables à ceux rapportés par *Ljung et al. (2011)*, qui ont observé des teneurs similaires dans les formules infantiles. Toutefois, bien que les concentrations soient proches, *Rebello et Caldas (2016)* soulignent que la biodisponibilité du cuivre est significativement plus élevée dans le lait maternel, ce qui le rend plus efficace pour la couverture des besoins infantiles [239,248]. A l'inverse, une exposition excessive au cuivre a été associée à des effets délétères sur les systèmes endocrinien, immunitaire et reproducteur, soulignant la nécessité de contrôler rigoureusement son apport.

- **Zinc (Zn)**

La teneur moyenne en zinc dans les PPN est de **0,91 mg/100 Kcal**, contre **0,74 mg/100 Kcal** dans le lait maternel. Ces valeurs sont compatibles avec celles observées dans des formules enrichies, telles que rapportées par *Paiva et al. (2023)* [219]. L'Organisation mondiale de la santé (*WHO, 1989*) précise que les nourrissons alimentés au lait artificiel présentent des besoins accrus en zinc, en raison d'une absorption intestinale moindre comparée à celle observée avec le lait maternel [250].

- **Fer (Fe)**

La concentration moyenne de fer dans les préparations pour nourrissons est de 1,11 mg/100 Kcal, contre 0,33 mg/100 Kcal dans le lait maternel. Cette tendance concorde avec les données de *Ljung et al. (2011)*, qui ont rapporté que les formules infantiles contiennent en moyenne 2

à 10 fois plus de fer que le lait maternel. Toutefois, *WHO (1989)* rappelle que l'absorption du fer est plus efficace à partir du lait maternel, en raison de la présence de lactoferrine et d'autres cofacteurs qui facilitent son assimilation [239,250].

- **Manganèse (Mn)**

Le manganèse est mesuré à 17,7 µg/100 Kcal dans les PPN et 2,22 µg/100 Kcal dans le lait maternel. Cette différence significative est préoccupante, étant donné le potentiel neurotoxique du manganèse à fortes doses, notamment chez les nourrissons dont les mécanismes d'élimination hépatique ne sont pas encore pleinement développés. *Ljung et al. (2011)* rapportent des niveaux jusqu'à 50 fois plus élevés dans les formules infantiles, et *Rebelo et Caldas (2016)* recommandent une surveillance stricte de cet élément [239,248].

- **Sodium (Na)**

Les teneurs observées sont de 41,2 mg/100 Kcal dans les PPN contre 23,7 mg/100 Kcal dans le lait maternel. Des apports élevés en sodium peuvent poser un risque d'hyperosmolarité, en raison de la capacité rénale encore immature des nourrissons. *Ljung et al. (2011)* et *Paiva et al. (2023)* mettent en garde contre une charge rénale excessive et un risque potentiel d'hypertension à long terme, en lien avec des teneurs excessives en sodium dans certaines formules [219,239].

- **Potassium**

Le potassium est le minéral le plus représenté, avec des teneurs moyennes de 95,0 mg/100 Kcal dans les PPN et 62,9 mg/100 Kcal dans le lait maternel. *Rebelo et Caldas (2016)* confirment cette tendance, notant que les formules infantiles sont généralement plus riches en potassium pour compenser une absorption parfois moins efficace que celle observée avec le lait maternel. Toutefois, *WHO (1989)* souligne que le lait maternel reste mieux adapté au profil d'excrétion rénale du nourrisson, ce qui renforce son statut de référence nutritionnelle optimale [248,250].

- **Magnésium (Mg)**

Nos résultats révèlent des concentrations moyennes de 10,9 mg/100 Kcal dans les PPN, contre 5,2 mg/100 Kcal dans le lait maternel. *Ljung et al. (2011)* et *WHO (1989)* ont également observé des niveaux plus élevés dans les préparations infantiles, notant que le magnésium est crucial pour la minéralisation osseuse, mais que son absorption est plus efficace à partir du lait maternel, ce qui justifie la prudence dans l'enrichissement excessif des formules [239,250].

- Comparaison avec les normes réglementaires

L'analyse comparative aux normes algériennes et européennes montre que les teneurs en fer et manganèse respectent intégralement les seuils réglementaires. En revanche, 17 échantillons sont en dessous des valeurs recommandées pour le cuivre et 6 pour le zinc. Quelques cas de dépassement des normes ont été observés pour le sodium et le magnésium, tandis que le potassium est resté conforme dans tous les échantillons analysés. Ces résultats confirment ceux rapportés par *Paiva et al. (2023)* et *Ljung et al. (2011)*, qui soulignent que malgré les efforts de formulation, certaines préparations commerciales peuvent présenter des profils nutritionnels déséquilibrés, soit par déficit soit par excès, selon les marques et les lots [219,239].

4. Conclusion

L'analyse approfondie menée dans ce chapitre a permis de comparer, de manière rigoureuse, les teneurs en aluminium, en métaux toxiques et en minéraux essentiels dans le lait maternel et les préparations pour nourrissons (PPN) disponibles sur le marché algérien. Les résultats obtenus mettent en lumière des disparités importantes entre ces deux sources d'alimentation infantile, tant du point de vue de la contamination métallique que de la valeur nutritionnelle.

Les données révèlent que le lait maternel présente une teneur en aluminium significativement plus faible que les PPN, ce qui confirme son rôle protecteur vis-à-vis de l'exposition aux contaminants environnementaux, en accord avec les recommandations de l'OMS. Les préparations infantiles, en particulier les formules végétales et spécialisées, affichent des concentrations préoccupantes en aluminium, parfois proches ou au-delà des seuils tolérables définis par les instances internationales. Cette contamination peut être attribuée à l'origine des matières premières, aux procédés industriels et aux matériaux d'emballage.

L'analyse des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) souligne une exposition accrue à l'aluminium chez les nourrissons nourris aux PPN, notamment durant les premiers mois de vie, période de grande vulnérabilité biologique. A l'inverse, les DHI estimées à partir du lait maternel restent largement inférieures aux valeurs de référence, d'où l'intérêt de promouvoir l'allaitement exclusif.

Concernant les métaux toxiques, bien que la majorité des échantillons respecte les normes de sécurité pour le plomb et le mercure, quelques dépassements ont été observés, soulignant la

nécessité d'un contrôle plus strict des matières premières et des procédés industriels. Le chrome et le nickel, quant à eux, sont systématiquement détectés dans les PPN, sans encadrement réglementaire spécifique à ce jour, ce qui pose la question de leur régulation dans les produits destinés aux nourrissons.

Enfin, l'évaluation des minéraux nutritionnels met en évidence des apports globalement conformes aux recommandations, bien que certaines formules présentent des excès (notamment en sodium et manganèse) ou des déficits (en cuivre et zinc). Ces déséquilibres pourraient avoir des conséquences sur la santé infantile, en particulier dans le cas d'une consommation exclusive ou prolongée de certaines formules.

Dans l'ensemble, ces résultats plaident en faveur d'une révision des normes nationales, d'une amélioration des contrôles de qualité à l'importation et d'une valorisation active de l'allaitement maternel comme stratégie de santé publique. Par ailleurs, la future production locale de laits infantiles devrait s'accompagner de protocoles analytiques stricts, intégrant la surveillance des contaminants métalliques et des apports nutritionnels essentiels, afin de garantir une alimentation infantile sûre, équilibrée et conforme aux standards internationaux.

CHAPITRE III.

**Développement, optimisation et
validation d'une méthode
spectrophotométrique pour la
quantification de l'aluminium dans
les eaux de consommation**

1. Matériels et méthodes

1.1. Choix de la méthode et des échantillons

Dans le cadre de cette recherche, une méthode spectrophotométrique de dosage de l'aluminium a été optimisée puis validée. Cette méthode repose sur la spectrophotométrie d'absorption moléculaire utilisant le Rouge d'Alizarine S comme agent complexant. Elle est officiellement appliquée par les laboratoires centraux de l'Algérienne des Eaux et bénéficie d'une reconnaissance internationale en raison de sa sensibilité, de sa fiabilité, et de sa précision, comme le rapportent plusieurs travaux scientifiques [113,251,252,112].

Les atouts majeurs de cette méthode résident dans :

- Sa simplicité d'exécution, ce qui la rend adaptée aux laboratoires de routine ;
- Son faible coût, comparé à des techniques plus sophistiquées telles que l'ICP-MS ;
- Sa reproductibilité et sa justesse analytique, garantissant des résultats robustes pour le contrôle de l'aluminium dans les eaux de consommation.

1.1.1. Principe de la méthode

Le dosage repose sur la capacité de l'ion Al^{3+} à former un complexe coloré en présence du Rouge d'Alizarine S, dans un milieu tamponné à pH 4,5. Ce complexe, dont la couleur varie du rouge au rose, présente une absorbance maximale mesurable par spectrophotométrie à 510 nm. L'intensité de la coloration est directement proportionnelle à la concentration en aluminium dans la solution analysée [113,251].

La réaction peut être schématisée ainsi :

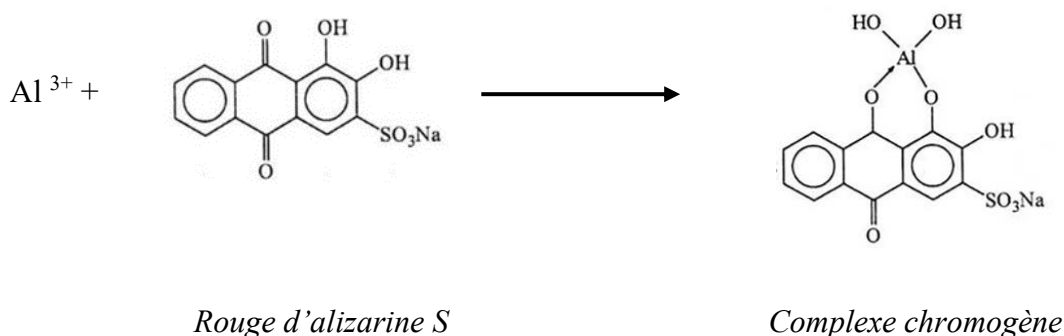


Figure 59. Représentation schématique de la réaction de formation du complexe Aluminium–Rouge d'Alizarine S.

1.1.2. Sélection des eaux à analyser

Conformément aux recommandations en matière de santé publique, seules les eaux reconnues comme potables ont été retenues dans cette étude, en particulier celles destinées à la préparation des biberons pour nourrissons [253]. Ainsi, les analyses ont porté exclusivement sur deux types d'eau : l'eau du robinet et les eaux conditionnées en bouteilles (eaux minérales naturelles et eaux de source).

Ont été exclues toutes les eaux ne faisant pas l'objet d'un contrôle sanitaire régulier, telles que celles issues de sources non surveillées ou acheminées par camions-citernes.

1.2. Matériel de laboratoire

1.2.1. Verrerie

De la verrerie de laboratoire classique a été utilisée pour les étapes de préparation, de prélèvement et de traitement des échantillons, notamment des fioles jaugées, des béchers, des pipettes graduées et des éprouvettes.

1.2.2. Equipements

- Balance analytique de précision (Adam Equipment, $\pm 0,0001$ g).
- Etuvé (Mettler).
- Dessiccateur.
- Hotte à flux laminaire.
- Réfrigérateur (maintenu à $+4^{\circ}\text{C}$).
- Spectrophotomètre UV-Visible (Shimadzu UV-1900i).
- pH-mètre Eutech Instruments (modèle pH 510 / mV / $^{\circ}\text{C}$).
- Plaque chauffante avec agitateur magnétique (IKA® RH basic 2).
- Bain-marie (Bioblock Scientific).
- Conductimètre (Hanna Instruments EC 214).
- Potentiomètre (Eutech Ion 510).

1.2.3. Réactifs

Les réactifs mobilisés au cours de cette étude sont tous de grade analytique et incluent :

- L'acide nitrique (69 %, Merck Emsure®), l'acide perchlorique, l'acide acétique (99–100 %), ainsi que le chlorure d'aluminium hexahydraté et l'acétate de sodium anhydre.
- Des composés organiques spécifiques ont également été utilisés : la L-histidine, l'acide ascorbique et la polyvinylpyrrolidone (PVP 40).
- Un agent complexant, le Rouge d'Alizarine S.

1.3. Caractéristiques des eaux analysées

1.3.1. Eau du robinet

L'étude a été menée dans la ville d'Annaba (nord-est de l'Algérie) [254], dont la population est estimée à 793 172 habitants [174]. Les prélèvements ont été effectués durant le mois de décembre 2024.

- **Nombre d'échantillons**

Conformément aux recommandations de l'OMS pour la surveillance des réseaux de distribution d'eau potable, le nombre minimal d'échantillons recommandé pour une population > 500 000 habitants est de 23 prélèvements par mois. Pour améliorer la représentativité, 30 échantillons ont été analysés [255].

- **Méthodologie de prélèvement**

Les flacons en polyéthylène ont été préalablement nettoyés selon un protocole strict afin d'éviter toute contamination métallique :

- Lavage avec un détergent non ionique sans métaux ;
- Rinçage à l'eau du robinet ;
- Trempage 24 h dans une solution d'acide nitrique diluée 1:2 ;
- Rinçage final à l'eau purifiée [109].

Les étapes de prélèvement ont été les suivantes :

- Laisser couler l'eau à plein débit 5 à 10 secondes, puis réduire et attendre encore 2 minutes ;
- Remplir les flacons à $\frac{3}{4}$ de leur capacité sans contact avec le robinet ;
- Fermer hermétiquement, étiqueter et transporter à 4 °C [105,109].

La quantité prélevée était d'environ 1 litre.

- **Sites de prélèvement**

Les échantillons ont été collectés en collaboration avec le laboratoire central de l'Algérienne des Eaux (Annaba). Les sites ont été choisis pour refléter différents points du réseau de distribution :

- Réservoirs principaux ;
- Zones résidentielles ;
- Points aux extrémités du réseau ;
- Infrastructures sensibles.

Le pH et la conductivité ont été mesurés immédiatement à l'arrivée au laboratoire d'Hydrologie-Bromatologie de la faculté de médecine d'Annaba.

- **Conservation des échantillons**

Les échantillons n'ont pas nécessité de filtration ni de digestion préalable, la turbidité étant < 1 NTU (Unité de Turbidité Néphélométrique) [256]. L'acidification à pH < 2 a été effectuée avec de l'acide nitrique de haute pureté (1,5 à 3 mL/L). Les fractions destinées à l'étude du relargage ont été préalablement bouillies avant acidification. La conservation s'est faite à 4 °C pour une durée maximale d'un mois [105].

1.3.2. Eaux conditionnées en bouteille

Annaba dispose d'une large offre d'eaux embouteillées en contenances de 150 mL à 6 L. Les marques sont réparties entre eaux minérales naturelles et eaux de source. Les échantillons ont été sélectionnés dans différents points de vente (épiceries, grandes surfaces).

- **Nombre d'échantillons**

En l'absence de données de variabilité sur l'aluminium dans ces eaux, le nombre minimal d'échantillons a été calculé selon la formule [256] :

$$n = \frac{\ln(\alpha)}{\ln(1 - Y)}$$

Où :

- **n** : nombre d'échantillons nécessaires,
- **α** = 0,05 : 1 – niveau de confiance correspondant à un niveau de confiance de 95 %,
- **Y** = 0,1 : fréquence cible fixée à 10 %, soit une probabilité maximale de 10 % pour les erreurs (faux positifs ou faux négatifs).

Cette approche a abouti à un minimum de 29 échantillons. Au final, 36 échantillons ont été sélectionnés de manière aléatoire pour renforcer la représentativité.

- **Transport et conservation**

Les bouteilles, toutes intègres, ont été conservées à l'abri de la lumière et de la chaleur. Elles ont été étiquetées et transportées à +4 °C au laboratoire, où le pH et la conductivité ont été mesurés à réception. Les modalités de conservation étaient similaires à celles des échantillons d'eau du robinet.

2. Application des plans d'expériences dans l'optimisation de la méthode

Le développement d'une méthode analytique performante nécessite une optimisation rigoureuse des conditions opératoires, permettant d'améliorer la sensibilité, la répétabilité et la robustesse de la méthode, tout en maintenant sa simplicité. Dans cette étude, une attention particulière a été portée à l'amélioration de l'absorbance du complexe formé. L'ajout de polyvinylpyrrolidone (PVP 40) comme agent stabilisant a été évalué, en raison de son rôle reconnu dans le renforcement de la sélectivité et de la stabilité du complexe [113].

Une première analyse spectrale a permis de comparer les spectres d'absorption du complexe avec et sans PVP 40, et de déterminer la longueur d'onde optimale (510 nm). Le balayage spectral a été réalisé pour identifier la longueur d'onde optimale du complexe. Les résultats sont présentés dans les Figures 60 et 61.

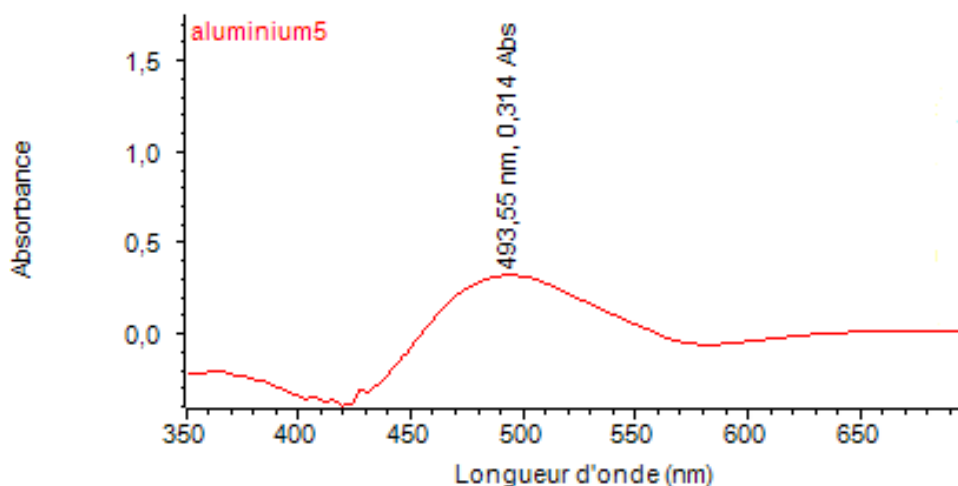


Figure 60. Balayage spectral du complexe Rouge d'Alizarine S-Aluminium.

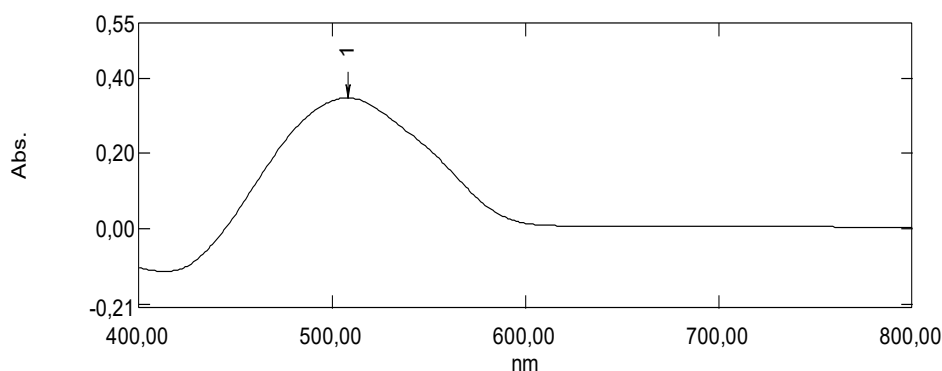


Figure 61. Balayage spectral du complexe Rouge d'Alizarine S-Aluminium avec ajout de PVP 40.

Par la suite, quatre facteurs susceptibles d'influencer significativement la formation du complexe ont été identifiés : la concentration du Rouge d'Alizarine S, celle du PVP 40, la concentration du tampon acétate, et le temps de développement de la coloration. Sans agent surfactant, un temps de réaction de 90 à 120 minutes était nécessaire pour obtenir un signal significatif [257].

L'optimisation a été réalisée selon les étapes classiques des plans de surface de réponse :

- Définition du critère d'optimisation : absorbance mesurée à 510 nm.
- Sélection des facteurs influents : concentration du colorant, de la PVP 40, du tampon, et temps de réaction.
- Délimitation du domaine expérimental : choix de plages réalistes et pertinentes.
- Choix du modèle statistique : modèle quadratique.
- Plan d'expérience : plan de criblage suivi d'un plan composite central.
- Expérimentation : réalisation des essais et mesure de l'absorbance.
- Calcul des coefficients du modèle.
- Identification des effets significatifs via ANOVA.
- Détermination et validation des conditions optimales

2.1. Criblage des facteurs

Pour explorer les meilleures combinaisons expérimentales, nous avons utilisé le logiciel NemrodW® (version 2017).

2.1.1. Sélection des facteurs expérimentaux

Afin de déterminer les facteurs les plus influents pour maximiser l'absorbance du complexe en un temps réduit, nous avons identifié quatre facteurs :

- Concentration du tampon
- Concentration du Rouge d'Alizarine S
- Concentration de PVP 40
- Temps de développement de la coloration.

Le pH du tampon a été fixé à 4,5, valeur recommandée par plusieurs études pour la stabilité du complexe [112,113]. Les autres facteurs présentant une variabilité dans la littérature, une étude d'optimisation expérimentale s'est avérée nécessaire.

2.1.2. Domaine expérimental et définition des niveaux

Le choix des niveaux des facteurs est déterminant pour assurer la validité du modèle. Des plages trop étroites limiteraient la représentativité, tandis que des plages trop larges pourraient compromettre la linéarité du modèle. Les valeurs retenues ont été définies sur la base de connaissances préalables et de contraintes pratiques liées aux réactifs.

L'influence de la Concentration du Rouge d'Alizarine S (Conc. R Alizarine S), de la Concentration de PVP 40 (Conc. PVP 40), du Temps de développement de la coloration ainsi que la Concentration du tampon (Conc. Tampon), a été menée via un plan de criblage qui nécessitait 2 valeurs par facteur. Le pH du tampon a été fixé à 4,5, pour toutes les expériences. Donc nous avons :

Nombre de facteur : $k = 4$

Nombre de modalité : $m_i = 2$

$N_{\text{total}} = 2^4 = 16$ expériences possibles

Les plans d'expériences que nous allons décrire dans cette partie, vont évidemment montrer qu'il n'est pas nécessaire de réaliser les 16 expériences.

Dans le cas présent, tous les facteurs présentent deux modalités, la première modalité indique conventionnellement l'état de référence. Ces modalités sont reportées dans le Tableau 73.

Tableau 73. Domaine expérimental.

| | Facteur | Unité | Nombre niveaux | Codes niveaux | Niveaux |
|-----------|---------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
| U1 | Conc. R Alizarine S | $\mu\text{mol/L}$ | 2 | -1 | 25 |
| | | | | +1 | 400 |
| U2 | Conc. PVP 40 | % m/v | 2 | -1 | 1 |
| | | | | +1 | 10 |
| U3 | Temps | min | 2 | -1 | 5 |
| | | | | +1 | 35 |
| U4 | Conc. Tampon | M | 2 | -1 | 0,1 |
| | | | | +1 | 0,5 |

Les plans de criblage offrent uniquement des possibilités d'estimation des effets moyens des facteurs par l'intermédiaire d'un modèle additif sans couplage. Lorsque le nombre de modalités m_i est égal à 2 pour tous les facteurs, le nombre N de traitements expérimentaux distincts à réaliser est égal au multiple de 4 immédiatement supérieur ou égal au nombre p d'inconnues à estimer. *R.L. Plackett et J.P. Burmann* [258] ont généralisé la méthode de construction de tels plans d'expériences. Repris et remodelés lors de la diffusion de la méthode *Taguchi* [259], les plans de Plackett et Burmann ont connu et rencontrent encore aujourd'hui un grand succès dans le monde industriel où, pour des raisons économiques, le nombre N de traitements expérimentaux distincts reste généralement limité (en général, il faut que N reste inférieur à 25).

Le nombre N est parfois appelé nombre d'Hadamard. Ces matrices sont également parfois appelées des matrices d'Hadamard.

- **Principe de la construction du plan d'expérience selon Plackett et Burmann**

L'arrangement orthogonal permet d'étudier les effets moyens des 4 facteurs ($k = 4$) à 2 modalités ($m_i = 2$) à partir de 8 traitements distincts ($N = 8$) au lieu des 16 expériences initiales (tableau 74 et 75).

Tableau 74. Matrice d'expérience (niveaux codés).

| N° Exp | X1 | X2 | X3 | X4 |
|--------|----|----|----|----|
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 2 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 5 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 7 | 1 | 1 | -1 | 1 |
| 8 | -1 | -1 | -1 | -1 |

Tableau 75. Plan d'expérimentation (niveaux réels).

| N° Exp | Conc. R Alizarine S µmol/L | PVP 40 % m/v | Temps min | Conc. Tampon M |
|--------|-------------------------------|-----------------|--------------|-------------------|
| 1 | 400 | 10 | 35 | 0,1 |
| 2 | 25 | 10 | 35 | 0,5 |
| 3 | 25 | 1 | 35 | 0,5 |
| 4 | 400 | 1 | 5 | 0,5 |
| 5 | 25 | 10 | 5 | 0,1 |
| 6 | 400 | 1 | 35 | 0,1 |
| 7 | 400 | 10 | 5 | 0,5 |
| 8 | 25 | 1 | 5 | 0,1 |

La matrice d'expériences obtenue après le rajout de la dernière ligne possède des propriétés d'orthogonalité, donc elle garantit une estimation des effets moyens avec une incertitude minimale. L'estimation des effets moyens des facteurs s'effectue en comparant la moyenne des réponses observées pour chacune des modalités des facteurs. Cette comparaison est d'autant plus équitable que l'on introduit le même nombre d'observations dans chacune des moyennes et que ces observations sont nombreuses. C'est pour cette raison que l'on retrouve le même nombre de signes positifs et négatifs dans chaque colonne du tableau précédent. Par ailleurs, chaque fois qu'un facteur est affecté d'un signe positif ou négatif dans une colonne, l'ensemble des autres facteurs apparaît le même nombre de fois avec un signe positif et avec un signe négatif dans les autres colonnes.

Donc, l'étude d'aucune modalité particulière n'est privilégiée [258].

- **Expérimentations**

La mise en œuvre des expériences ne pose pas ici de problèmes particuliers ; l'affectation des variables de prédiction dans les colonnes du tableau, représentant le plan d'expériences, reprend l'ordre de présentation de ces variables. Les traitements expérimentaux sont réalisés suivant l'ordre des lignes du Tableau 73. A cette étape, il est important de préparer le bon déroulement du plan d'expériences.

2.1.3. Résultats et discussion

Ce tableau montre les huit (08) combinaisons expérimentales des quatre facteurs étudiés ainsi que la réponse mesurée (absorbance).

Tableau 76. Plan d'expérimentation et réponses mesurées.

| N° Exp. | Conc. R Alizarine S (μmol/L dans 25ml) | Conc. PVP 40 (% m/v) | Temps (min) | Conc. Tampon (M) | Absorbance |
|---------|----------------------------------------|----------------------|-------------|------------------|------------|
| 1 | 400 | 10 | 35 | 0,1 | 0,318 |
| 2 | 25 | 10 | 35 | 0,5 | 0,063 |
| 3 | 25 | 1 | 35 | 0,5 | 0,061 |
| 4 | 400 | 1 | 5 | 0,5 | 0,366 |
| 5 | 25 | 10 | 5 | 0,1 | 0,064 |
| 6 | 400 | 1 | 35 | 0,1 | 0,332 |
| 7 | 400 | 10 | 5 | 0,5 | 0,378 |
| 8 | 25 | 1 | 5 | 0,1 | 0,100 |

L'approche du modèle polynomial repose sur l'utilisation d'un polynôme du premier degré de telle sorte que, pour l'expression du résultat de l'essai du $i^{\text{ème}}$ traitement repéré par y_i , on puisse écrire :

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_j X_{i,j} \quad (1)$$

En remplaçant les indices par les abréviations des facteurs de l'étude, nous obtenons :

$$Y_i = b_0 + b_{\text{Conc. R Alizarine S}} X_{i, \text{Conc. R Alizarine S}} + b_{\text{Conc. PVP}} X_{i, \text{Conc. PVP}} + b_{\text{Temps}} X_{i, \text{Temps}} + b_{\text{Conc. Tampon}} X_{i, \text{Conc. Tampon}}$$

En utilisant les valeurs de $X_{i,j}$ proposées par la matrice d'expériences et la définition du modèle (1), on peut écrire le système suivant :

$$\hat{y}_1 = b_0 + b_{\text{Conc. R Alizarine S}} + b_{\text{Conc. PVP}} + b_{\text{Temps}} + b_{\text{Conc. Tampon}}$$

$$\hat{y}_2 = b_0 + b_{\text{Conc. R Alizarine S}} + b_{\text{Conc. PVP}} + b_{\text{Temps}} + b_{\text{Conc. Tampon}}$$

$$\hat{y}_3 = b_0 + b_{\text{Conc. R Alizarine S}} + b_{\text{Conc. PVP}} + b_{\text{Temps}} + b_{\text{Conc. Tampon}}$$

$$\hat{y}_4 = b_0 + b_{\text{Conc. R Alizarine S}} + b_{\text{Conc. PVP}} + b_{\text{Temps}} + b_{\text{Conc. Tampon}}$$

$$\hat{y}_5 = b_0 + b_{\text{Conc. R Alizarine S}} + b_{\text{Conc. PVP}} + b_{\text{Temps}} + b_{\text{Conc. Tampon}}$$

$$\hat{y}_6 = b_0 + b_{\text{Conc. R Alizarine S}} + b_{\text{Conc. PVP}} + b_{\text{Temps}} + b_{\text{Conc. Tampon}}$$

$$\hat{y}_7 = b_0 + b_{\text{Conc. R Alizarine S}} + b_{\text{Conc. PVP}} + b_{\text{Temps}} + b_{\text{Conc. Tampon}}$$

$$\hat{y}_8 = b_0 + b_{\text{Conc. R Alizarine S}} + b_{\text{Conc. PVP}} + b_{\text{Temps}} + b_{\text{Conc. Tampon}}$$

Il faut noter que la constante b_0 du modèle correspond à la moyenne arithmétique des résultats d'essai.

$$b_0 = (+Y_1+Y_2+Y_3+Y_4+Y_5+Y_6+Y_7+Y_8) / 8$$

Les estimateurs b_j obtenus par le concept des coefficients (calcul du logiciel NemrodW) sont reportés dans le Tableau 77.

Tableau 77. Estimation et significativité des coefficients.

| Nom | Coefficient | F. Inflation | Ecart-Type | t.exp | Signif (%) |
|--------------------------|-------------|--------------|------------|--------|------------|
| b0 (constante) | 0,210 | 1,000 | 0,005 | 40,150 | < 0,010*** |
| b1(R.Alizarine S) | 0,138 | 1,000 | 0,005 | 26,400 | 0,012*** |
| b2 (PVP 40) | -0,004 | 1,000 | 0,005 | -0,860 | 45,300 |
| b3 (Temps) | -0,016 | 1,000 | 0,005 | -3,200 | 4,940* |
| b4 (Tampon) | 0,006 | 1,000 | 0,005 | 1,290 | 28,800 |

L'analyse des résultats sous forme graphique facilite souvent l'interprétation des informations obtenues. Il existe différents types de graphiques pour illustrer les effets moyens des facteurs : les plus courants sont le diagramme en bâtons et le diagramme de Pareto.

La construction du tracé des effets moyens utilise les valeurs des coefficients reportés dans le Tableau 77, présentées sous forme de « diagramme en bâtons ». La surface de chaque bâton est proportionnelle à la valeur de l'effet de ce facteur sur la variation de la réponse.

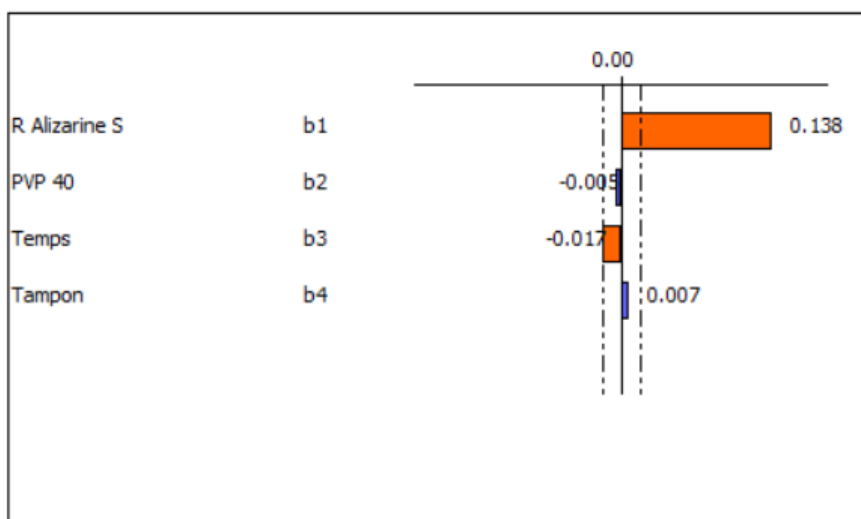


Figure 62. Etude graphique des effets : Effets individuels des facteurs sur la réponse. (Diagramme en bâtons)

Sur ce diagramme (figure 62), les limites de confiance indiquées par deux droites en pointillés correspondent à un seuil de signification.

La méthode de *Lenth* est plus récente [260] ; elle consiste à estimer une pseudo erreur-type pour mettre en œuvre un test statistique dont le résultat se traduit par le tracé des limites de signification sur le diagramme en bâtons.

Les coefficients b_j dont les valeurs estimées sont situées à l'extérieur des limites correspondent à des effets actifs. Les coefficients b_j dont les valeurs estimées sont situées à l'intérieur des limites correspondent à des effets non actifs. Entre ces deux limites, il est nécessaire de disposer d'informations complémentaires pour apporter une conclusion et se prononcer sur les effets moyens des facteurs.

Le facteur **b1** (Concentration de Rouge d'Alizarine S) a un effet positif majeur qui nous a permis de constater que l'augmentation de sa concentration améliore significativement l'absorbance.

Les facteurs **b2** (PVP 40) et **b3** (temps de réaction) ont des effets légèrement négatifs, mais moins significatifs, tandis que le facteur **b4** (concentration du tampon), a un effet positif très faible.

Pour la réponse traduisant l'absorbance du complexe Aluminium–Rouge d'Alizarine S, les tracés des effets moyens (Figure 62) fait ressortir immédiatement le facteur important : la variable (Concentration du Rouge d'Alizarine S) a le plus grand effet (positif), de plus, le

Temps de développement de la coloration apparait comme un facteur avec un effet négatif ayant une action moins importante. Les deux autres facteurs (Concentration de PVP 40 et Concentration du tampon) ne sont pas significatifs sur la réponse.

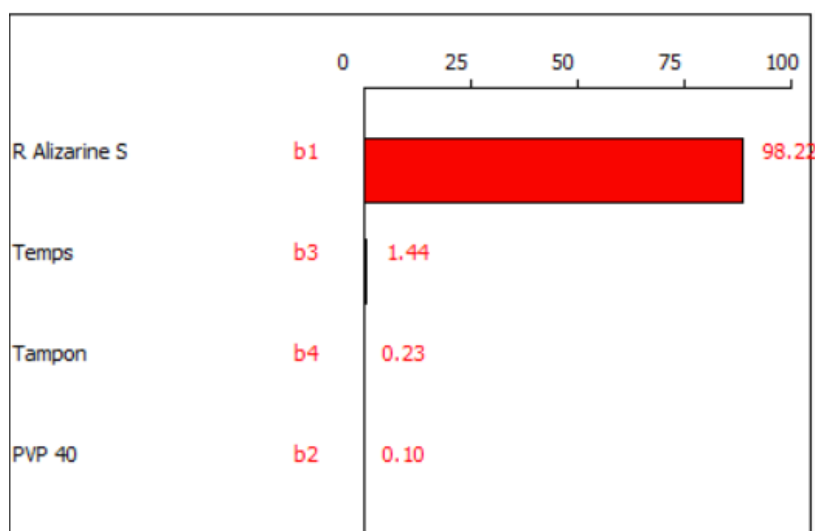


Figure 63. Effets Pareto individuels

Ce graphique des effets de Pareto montre que le paramètre concentration du Rouge d'Alizarine S (b1) est de loin le facteur le plus significatif, contribuant à 98,22 % de l'absorbance totale mesurée et avec un degré moindre (1,44 %), le temps de développement de la coloration. Les autres paramètres (concentration du tampon, concentration de PVP 40) ont une influence négligeable, avec des contributions respectives de 0,23 %, et 0,10 %.

Le Tableau 78 présente l'analyse de la variance (ANOVA) du modèle de régression construit pour l'étude de la réponse analytique.

Tableau 78. Tableau d'analyse de la variance.

| Source de variation | Somme des carrés | Degrés de liberté | Carré moyen | Rapport | Signif |
|---------------------|------------------|-------------------|-------------|---------|----------|
| Régression | 0,155 | 4 | 0,038 | 177,440 | 0,068*** |
| Résidus | 0,0007 | 3 | 0,000 | - | - |
| Total | 0,156 | 7 | - | - | - |

Le modèle obtenu présente un excellent ajustement aux données expérimentales ($R^2 = 0,996$), avec une erreur faible et un bon pouvoir prédictif ($R^2 \text{ pred} = 0,970$).

Bien que la p-value du test F (0,0681) ne permette pas de conclure à une significativité au seuil de 5 %, elle reste acceptable à un seuil de 10 %, ce qui permet d'envisager ce modèle comme **suffisamment pertinent** pour poursuivre l'analyse des effets significatifs, notamment pour la concentration du Rouge d'Alizarine S et le temps de développement.

Tableau 79. Estimations et statistiques des coefficients

| Paramètre | Valeur |
|----------------------------------------|--------|
| Ecart type de la réponse | 0,014 |
| R ² | 0,996 |
| R ² ajusté (R2A) | 0,990 |
| R ² prédictif (R2 pred) | 0,970 |
| PRESS | 0,004 |
| Nombre de degrés de liberté (Nbre ddl) | 3 |

Le tableau 79 résume les statistiques globales du modèle. Les valeurs élevées de R² (0,996) et R² prédictif (0,970) montrent que le modèle explique très bien la variance des données et est performant pour prédire de nouvelles observations. L'écart type de la réponse (0,0148) et la valeur faible de PRESS (0,0047) confirment la précision du modèle.

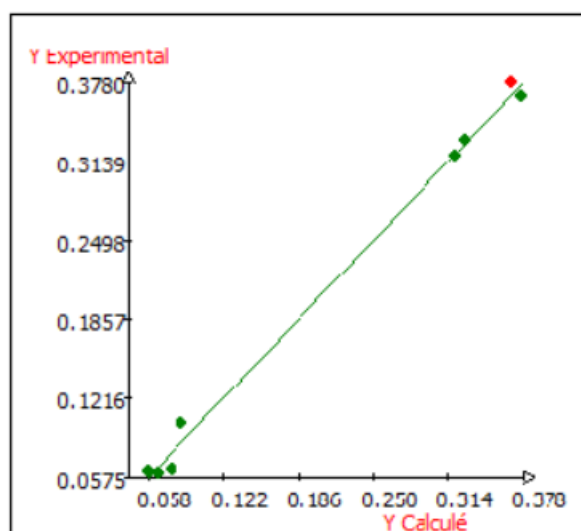


Figure 64. Y expérimental / Y calculé.

Cette figure représente la corrélation entre les valeurs expérimentales (Y Experimental) et les valeurs calculées (Y Calculé) par le modèle. Les points se rapprochent étroitement de la diagonale, une bonne concordance entre les données expérimentales et les prédictions du modèle est prouvée.

En conclusion, ce plan de criblage met bien en évidence les paramètres qui ont peu d'influence sur la réponse et permet de choisir au mieux, ceux qui semblent les plus intéressants pour une étude ultérieure plus précise. Ces deux facteurs sont : concentration de la solution du Rouge d'Alizarine S et temps de développement de la coloration. Le premier possède une influence significative sur l'absorbance mesurée et joue un rôle critique dans l'optimisation de la réponse analytique. Le second, quant à lui, présente une influence légère mais négative sur la réponse.

A l'inverse, les facteurs tels que la concentration de PVP 40 et la concentration du tampon acide acétique-acétate de sodium n'ont pas d'impact notable sur l'absorbance. Ils peuvent être fixés à une valeur quelconque dans la plage explorée. Nous avons choisi de fixer ces deux paramètres à des valeurs respectivement de 1% et 0,1M.

N'oublions pas l'autre paramètre qui a été fixé au départ : le pH = 4,5. Le tableau 80 résume les valeurs prises pour les facteurs fixés pour la suite de l'étude.

Tableau 80. Facteurs fixés pour le reste de l'étude.

| pH tampon | Conc. PVP 40 (% m/v) | Conc. Tampon (M) |
|-----------|----------------------|------------------|
| 4,5 | 1 | 0,1 |

Un plan d'expériences à surface de réponses (plan central composite) permettra d'obtenir un réglage plus affiné de ces deux facteurs correspondant à une optimisation de l'absorbance du complexe, garantissant ainsi des mesures précises et fiables pour la détermination de la concentration en aluminium dans l'eau.

2.2. Plan composite central

Afin d'affiner l'optimisation de la méthode de dosage colorimétrique de l'aluminium, un plan composite central a été mis en œuvre. Cette approche permet d'évaluer plus finement l'effet de deux facteurs majeurs : la concentration en Rouge d'Alizarine S et le temps de réaction, identifiés comme déterminants lors de la phase préliminaire.

2.2.1. Facteurs étudiés et domaine expérimental

Les deux facteurs ont été étudiés selon trois niveaux (-1, 0, +1) autour de leurs valeurs centrales

Tableau 81. Facteurs étudiés et domaine expérimental.

| Code | Facteur | Unité | -1 (Bas) | 0 (Centre) | +1 (Haut) | Pas de variation |
|------|-------------------------|--------|-------------|---------------|--------------|---------------------|
| X1 | Conc. Rouge Alizarine S | µmol/L | 300,00 | 350,00 | 400,00 | 50,00 |
| X2 | Temps | min | 05,00 | 12,50 | 20,00 | 07,50 |

2.2.2. Plan d'expérimentation

Le plan d'expérimentation a été conçu en utilisant un plan composite central, où chaque facteur est étudié à trois niveaux (-1, 0, +1) avec une variation systématique pour évaluer les interactions. Chaque expérience est réalisée suivant une séquence aléatoire (Rand.) pour minimiser les biais expérimentaux (Tableau 82).

Tableau 82. Plan d'expérimentation

| N° Exp. | Rand. | X1 | X2 |
|---------|-------|--------|--------|
| 1 | 4 | 1 | 0 |
| 2 | 5 | -1 | 0 |
| 3 | 1 | 0,500 | 0,866 |
| 4 | 7 | -0,500 | -0,866 |
| 5 | 11 | 0,500 | -0,866 |
| 6 | 6 | -0,500 | 0,866 |
| 7 | 8 | 0 | 0 |
| 8 | 2 | 0 | 0 |
| 9 | 10 | 0 | 0 |
| 10 | 12 | -0,433 | -0,250 |
| 11 | 9 | 0,433 | -0,250 |
| 12 | 3 | 0 | 0,500 |

Tableau 83. Plan d'expérimentation avec réponses

| N° Exp. | Rand. | Conc.R Alizarine S μmol/L | Temps min | Absorbance |
|---------|-------|------------------------------|--------------|------------|
| 1 | 4 | 400 | 12,5 | 0,365 |
| 2 | 5 | 300 | 12,5 | 0,356 |
| 3 | 1 | 375 | 19 | 0,348 |
| 4 | 7 | 325 | 6 | 0,228 |
| 5 | 11 | 375 | 6 | 0,357 |
| 6 | 6 | 325 | 19 | 0,357 |
| 7 | 8 | 350 | 12,5 | 0,394 |
| 8 | 2 | 350 | 12,5 | 0,355 |
| 9 | 10 | 350 | 12,5 | 0,372 |
| 10 | 12 | 328,35 | 10,63 | 0,369 |
| 11 | 9 | 371,65 | 10,63 | 0,378 |
| 12 | 3 | 350 | 16,25 | 0,388 |

Le tableau 83 représente le plan d'expérimentation comportant les combinaisons des niveaux des facteurs étudiés (concentration de Rouge d'Alizarine S et temps) ainsi que les réponses mesurées en absorbance.

2.2.3. Modélisation mathématique

L'étude a été réalisée en utilisant un design de surface de réponse de type composite central, avec un modèle quadratique basé sur 12 essais aléatoires. Ce type de plan englobe les principaux facteurs, les termes quadratiques ainsi que les interactions du deuxième degré (Tableau 84).

Tableau 84. Caractéristiques du plan d'étude pour l'optimisation des facteurs

| Type d'étude | Sous-type | Type de design | Nombre d'essais | Modèle de design | Blocs | Temps de génération (ms) |
|--------------------|-----------|-------------------|-----------------|------------------|-------|--------------------------|
| Surface de réponse | Randomisé | Composite central | 12 | Quadratique | Aucun | 3 |

2.2.4. Analyse de la variance

Afin d'évaluer la qualité et la robustesse du modèle quadratique réduit, une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée. Le Tableau 85 présente les résultats de cette ANOVA.

Tableau 85. ANOVA pour le modèle quadratique réduit

| Source de variation | Somme des carrés | Degrés de liberté | Carré moyen | Rapport F | p-valeur | Significativité |
|----------------------------|------------------|-------------------|-------------|-----------|----------|-------------------|
| Modèle | 0,016 | 4 | 0,004 | 6,936 | 0,014 | Significatif |
| A | 0,001 | 1 | 0,001 | 2,229 | 0,179 | Non significatif |
| B | 0,003 | 1 | 0,003 | 5,818 | 0,047 | Significatif |
| A×B | 0,004 | 1 | 0,004 | 7,803 | 0,027 | Significatif |
| B² | 0,007 | 1 | 0,007 | 12,122 | 0,010 | Très significatif |
| Résidus | 0,004 | 7 | 0,000 | - | - | - |
| Manque d'ajustement | 0,003 | 4 | 0,000 | 2,524 | 0,236 | Non significatif |
| Erreur pure | 0,000 | 3 | 0,000 | - | - | - |
| Total corrigé | 0,012 | 11 | - | - | - | - |

Où :

- **A** : Influence de la concentration en Rouge d'Alizarine S.
- **B** : Influence du temps de réaction.
- **AB** : Interaction entre la concentration de Rouge d'Alizarine S et le temps.
- **B²** : Effet quadratique du temps.

Le modèle est significatif avec une valeur F de 6,94, indiquant qu'il existe seulement 1,39 % de chances qu'une telle valeur soit due au bruit. Les termes significatifs sont B, AB et B², avec des p-valeurs inférieures à 0,05. Par contre, la concentration de Rouge Alizarine (A) n'est pas significative (p = 0,1791). Le manque d'ajustement n'est pas significatif (p = 0,2364), alors le modèle s'ajuste bien aux données expérimentales. Une réduction du modèle pourrait être envisagée pour supprimer les termes non significatifs, tout en maintenant la hiérarchie du modèle.

2.2.5. Ajustement du modèle

Tableau 86. Statistiques d'ajustement et qualité du modèle

| Paramètre | Valeur |
|-------------------------------------|--------|
| Ecart-type | 0,024 |
| Moyenne | 0,356 |
| Coefficient de variation | 6,73% |
| Coefficient de détermination | 0,799 |
| R² ajusté | 0,683 |
| R² prédit | -1,530 |
| Précision adéquate | 9,235 |

Le Tableau 86 présente les principales statistiques d'ajustement. Un R² prédit négatif suggère que la moyenne globale serait un meilleur prédicteur de la réponse que le modèle actuel. Dans certains cas, un modèle d'ordre supérieur pourrait fournir de meilleures prédictions. La précision adéquate mesure le rapport signal/bruit. Un ratio supérieur à 4 est souhaitable. Ici, avec un ratio de 9,235, le modèle présente un signal adéquat et peut être utilisé pour explorer l'espace de conception.

2.2.6. Estimation des coefficients et statistiques des facteurs

Tableau 87. Estimation des coefficients et statistiques des facteurs

| Facteur | Coefficient estimé | Degrés de liberté | Erreur standard | IC 95% bas | IC 95% haut | VIF |
|----------------------|--------------------|-------------------|-----------------|------------|-------------|-------|
| Intercept | 0,375 | 1 | 0,009 | 0,354 | 0,396 | - |
| A | 0,019 | 1 | 0,013 | -0,011 | 0,050 | 1,003 |
| B | 0,033 | 1 | 0,014 | 0,001 | 0,065 | 1,002 |
| AB | -0,076 | 1 | 0,027 | -0,141 | -0,012 | 1,003 |
| B² | -0,069 | 1 | 0,020 | -0,117 | -0,022 | 1,002 |

Où :

IC 95% bas/haut : Intervalle de confiance à 95 % pour le coefficient estimé.

VIF (Variance Inflation Factor) : Mesure la multicolinéarité entre les facteurs. Une valeur proche de 1 indique l'absence de multicolinéarité.

Les constatations suivantes ont pu être tirées à partir du tableau 87 :

- Les coefficients estimés indiquent l'effet attendu sur la réponse pour une unité de variation du facteur, lorsque les autres facteurs restent constants.
- L'intercept représente la réponse moyenne globale pour toutes les conditions testées.
- Les termes A (Conc. Rouge Alizarine) et B (Temps) présentent des effets directs. L'effet du temps (B) est significatif car son intervalle de confiance n'inclut pas zéro.
- L'interaction AB et le terme quadratique B² sont également significatifs, montrant des influences combinées et non linéaires sur la réponse.
- Les VIF (Variance Inflation Factor), proches de 1, montrent une absence de multicolinéarité entre les facteurs, ce qui garantit la fiabilité des coefficients estimés.

2.2.7. Equations finales

En facteurs codés :

$$R1 = 0,3750 + 0,0195 \times A + 0,0328 \times B - 0,0762 \times AB - 0,0694 \times B^2$$

En unités réelles :

$$R1 = 0,375031 + 0,019484 \times [\text{Conc. Alizarine S}] + 0,032806 \times [\text{Temps}] - 0,076158 \times [\text{Conc.} \\ \times \text{Temps}] - 0,069429 \times [\text{Temps}^2]$$

Où :

R1 : est la réponse (absorbance)

A : est la concentration de Rouge d'Alizarine S.

B : est le temps.

AB : est l'interaction entre A et B.

B² : est l'effet quadratique du temps.

L'équation en termes de facteurs codés peut être utilisée pour prédire la réponse (R1) en fonction des niveaux donnés de chaque facteur. Dans cette représentation :

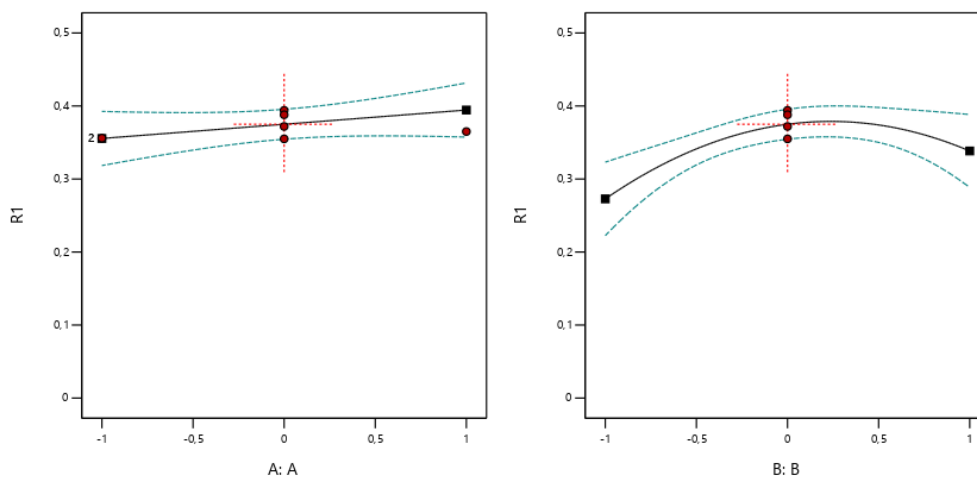
- Les niveaux élevés des facteurs sont codés comme **+1**.
- Les niveaux faibles des facteurs sont codés comme **-1**.

L'équation codée est utile pour identifier l'impact relatif des facteurs en comparant les coefficients des facteurs.

2.2.8. Représentations graphiques et résidus

- Représentation des effets simples, interactions et surfaces 3D

Factor Coding: Actual
 R1
 ● Design Points
 --- 95% CI Bands
 Actual Factors
 A = 0
 B = 0



(A) Concentration de Rouge Alizarine ($\mu\text{mol/L}$) et (B) Temps (min)

Figure 65. Effet des facteurs sur la réponse (R1)

Cette figure présente la représentation graphique des effets simples de deux facteurs sur la réponse R1 :

- (A) : la concentration en Rouge d'Alizarine S (en $\mu\text{mol/L}$)
- (B) le temps de réaction (en minutes)

Le graphique (A) indique une variation relativement linéaire de R1 en fonction de la concentration de Rouge d'Alizarine S, tandis que le graphique (B) révèle une relation quadratique avec le temps, et met en évidence une valeur optimale de réponse à une durée intermédiaire.

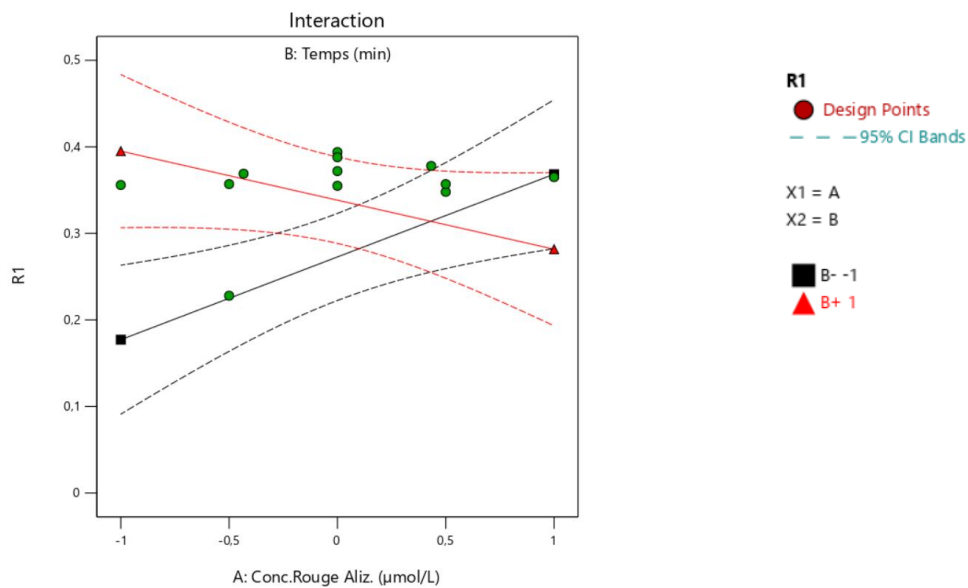


Figure 66. Effet d'interaction entre la concentration en Rouge d'Alizarine S et le temps sur la réponse (R1)

La Figure 66 met en évidence une interaction significative entre la concentration en Rouge d'Alizarine S et le temps de réaction.

Cette interaction signifie que l'effet de la concentration sur la réponse R1 varie en fonction du niveau du facteur temps. Autrement dit, l'impact de la concentration n'est pas constant, mais modulé par la durée de la réaction.

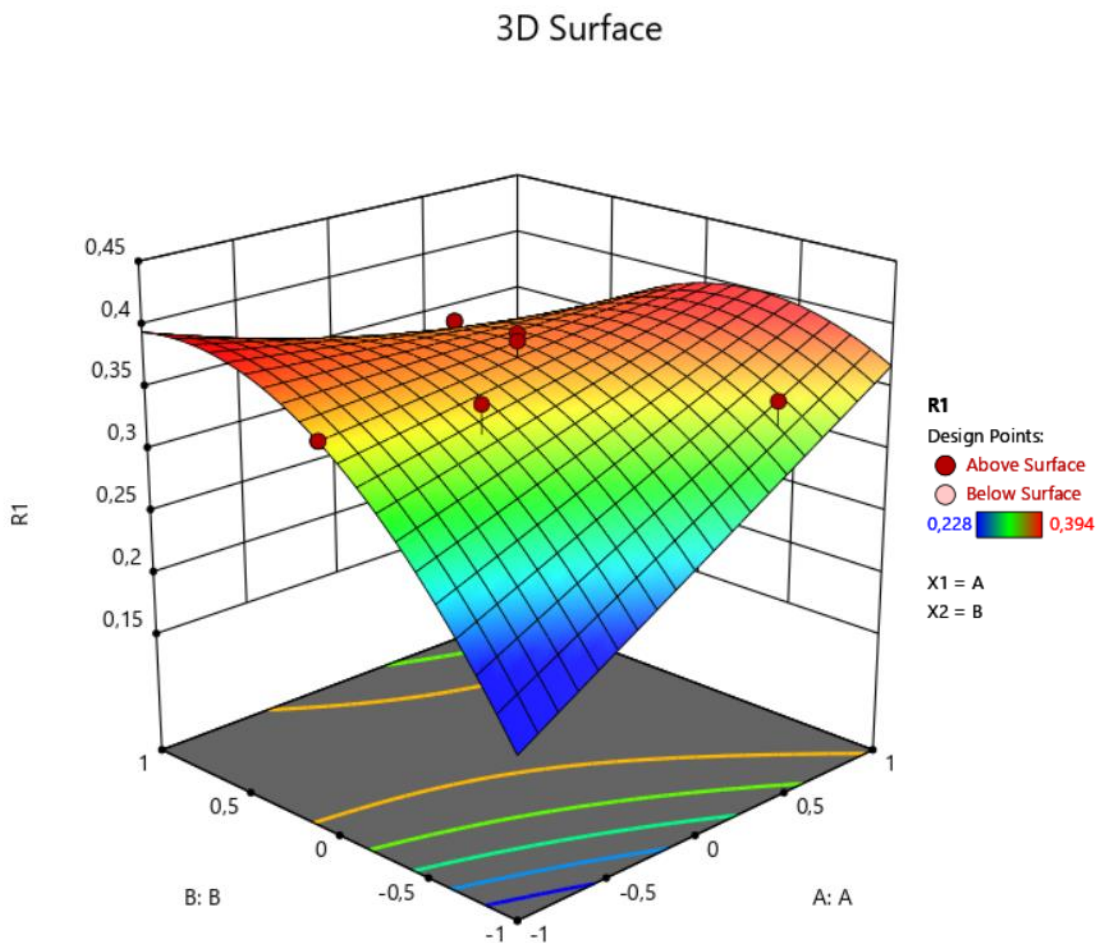


Figure 67. Représentation en surface 3D de l'influence des facteurs étudiés (Rouge d'Alizarine et Temps) sur l'absorbance (R1)

La Figure 67 illustre la surface de réponse 3D décrivant l'effet combiné de la concentration en Rouge d'Alizarine S et du temps de réaction sur l'absorbance mesurée (R1).

Les zones de couleur chaude (rouge) indiquent des valeurs d'absorbance élevées, tandis que les zones de couleur froide (bleu) correspondent à des absorbances plus faibles. Les points rouges représentent les points expérimentaux utilisés pour le modèle.

Cette représentation visuelle permet d'identifier les combinaisons optimales des deux facteurs pour maximiser l'absorbance mesurée.

- Validation des résidus, distribution normale, et absence de biais

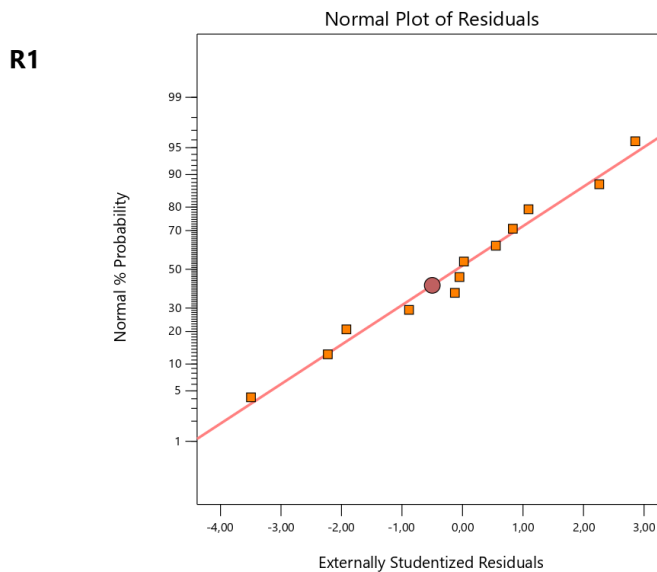


Figure 68. Graphique de la normalité des résidus

Les points suivent approximativement la ligne rouge, indiquant que les résidus sont normalement distribués. Le modèle est alors valide (Figure 68).

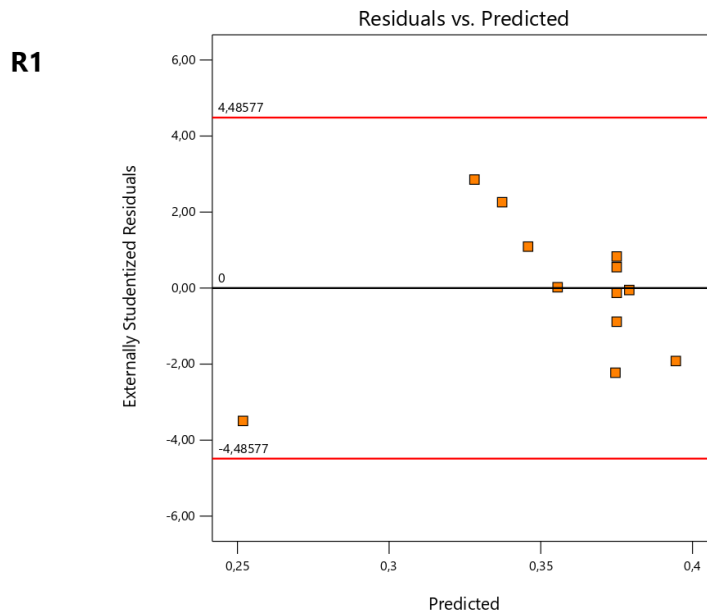


Figure 69. Graphique des résidus externes studentisés en fonction des valeurs prédites

Ce graphique représente les résidus externes studentisés en fonction des valeurs prédites. Les résidus sont dispersés de manière aléatoire autour de la ligne zéro, sans tendance évidente. Cela confirme l'absence de biais systématique et la validité du modèle pour prédire les réponses.

Tableau 88. Résumé des résultats expérimentaux et indicateurs statistiques.

| N° | Valeur réelle | Valeur prédite | Résidu | Leverage | Résidus studentisés internes | Résidus studentisés externes | Distance de Cook | Influence sur la valeur ajustée | Range |
|----|---------------|----------------|--------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------|---------------------------------|-------|
| 1 | 0,388 | 0,375 | 0,013 | 0,131 | 0,581 | 0,551 | 0,010 | 0,214 | 12 |
| 2 | 0,357 | 0,3746 | -0,017 | 0,829 | -1,779 | -2,226 | 3,074 | -4,905 | 6 |
| 3 | 0,372 | 0,375 | -0,003 | 0,131 | -0,135 | -0,126 | 0,0006 | -0,049 | 9 |
| 4 | 0,369 | 0,345 | 0,023 | 0,190 | 1,076 | 1,091 | 0,054 | 0,529 | 10 |
| 5 | 0,348 | 0,328 | 0,019 | 0,829 | 2,008 | 2,855 | 3,915 | 6,291 | 3 |
| 6 | 0,394 | 0,375 | 0,019 | 0,131 | 0,850 | 0,831 | 0,021 | 0,323 | 7 |
| 7 | 0,228 | 0,251 | -0,023 | 0,789 | -2,166 | -3,495 | 3,509 | -6,757 | 4 |
| 8 | 0,355 | 0,375 | -0,02 | 0,131 | -0,898 | -0,884 | 0,024 | -0,343 | 8 |
| 9 | 0,356 | 0,355 | 0,0005 | 0,429 | 0,025 | 0,023 | 0,0001 | 0,020 | 2 |
| 10 | 0,365 | 0,394 | -0,029 | 0,429 | -1,631 | -1,918 | 0,399 | -1,662 | 1 |
| 11 | 0,357 | 0,337 | 0,019 | 0,789 | 1,794 | 2,260 | 2,406 | 4,369 | 5 |
| 12 | 0,378 | 0,379 | -0,001 | 0,190 | -0,05 | -0,050 | 0,0001 | -0,024 | 11 |

Le tableau 88 résume les valeurs expérimentales, les valeurs prédites, les résidus et d'autres indicateurs statistiques associés. Les valeurs de résidus faibles et proches de zéro indiquent une bonne concordance entre les observations expérimentales et les prédictions du modèle. Les indices tels que la distance de Cook et les DFFITS mettent en évidence que les points influents sont sous contrôle, ce qui confirme la robustesse du modèle.

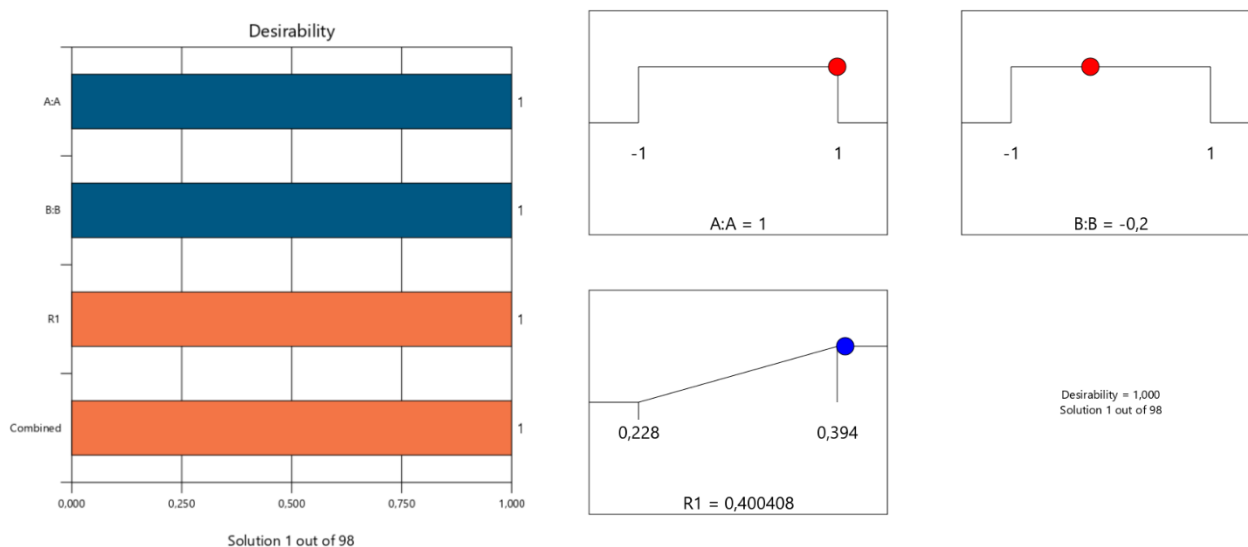
2.2.9. Optimisation

Dans le cadre de cette étude, une optimisation a été réalisée dans le but de maximiser la réponse R1 (absorbance).

L'optimisation a été conduite en explorant différentes combinaisons de niveaux des deux facteurs étudiés, à savoir la concentration de Rouge d'Alizarine S (A) et le temps (B). Le modèle a généré un total de 99 solutions potentielles. Parmi ces solutions, les cinq premières sont présentées dans le tableau 89.

Tableau 89. Tableau des solutions optimales pour maximiser la réponse R1

| Solution | A: Conc. Rouge Aliz. ($\mu\text{mol/L}$) | B: Temps (min) | R1 (Absorbance) | Statut |
|----------|--------------------------------------------|----------------|-----------------|--------------|
| 1 | 1,000 | -0,200 | 0,400 | Sélectionnée |
| 2 | 0,900 | -0,366 | 0,396 | - |
| 3 | -0,937 | 0,868 | 0,394 | - |
| 4 | 0,826 | -0,204 | 0,394 | - |
| 5 | 1,000 | 0,000 | 0,394 | - |

**Figure 70. Désirabilité combinée et individuelle pour la solution optimale sélectionnée**

La Figure 70 illustre les courbes de désirabilité obtenue lors de l'optimisation des paramètres expérimentaux.

La première solution a été sélectionnée car elle présente la valeur maximale de R1, ce qui satisfait pleinement l'objectif d'optimisation.

Les paramètres associés à cette solution sont une concentration de Rouge d'Alizarine S (A) codée à +1 (400 $\mu\text{mol/L}$) et un temps (B) codé à -0,2 (environ 10 minutes).

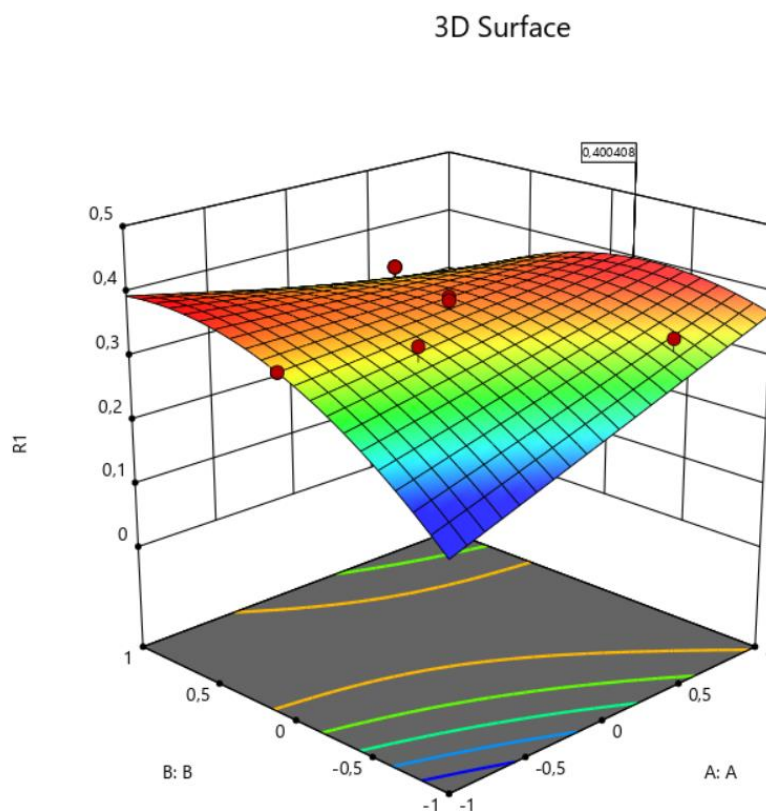


Figure 71. Graphique de surface en 3D pour la désirabilité.

La Figure 71 représente la surface de désirabilité en 3D, en fonction des deux facteurs étudiés: la concentration en Rouge d'Alizarine S et le temps de réaction. Cette surface permet de visualiser les zones de l'espace expérimental dans lesquelles les conditions d'optimisation sont les plus favorables.

La zone où la désirabilité est maximale, indique les conditions optimales.

2.2.10. Confirmation expérimentale des conditions optimales

La solution 1 proposée par le modèle a été confirmée par quatre expériences répétées sous les conditions optimales prédéfinies (Solution de Rouge d'Alizarine = 400 $\mu\text{mol/L}$ et Temps = 10 minutes). Les résultats obtenus pour la réponse (absorbance) se situent dans l'intervalle de confiance à 95 % prédit par le modèle, avec une moyenne expérimentale proche de la valeur prédite (Tableau 90). Ces données valident la robustesse et la précision du modèle pour l'optimisation de la méthode colorimétrique de dosage de l'aluminium.

Tableau 90. Validation expérimentale de la solution optimale prédite par le modèle.

| Solution | Réponse prédite | Médiane prédite | Valeurs observées | Ecart-type | SE Pred. | 95 % PI Bas | Moyenne des données | 95 % PI Haut |
|---------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|------------|----------|-------------|---------------------|--------------|
| 1 (sur 99) | 0,400 | 0,400 | 0,389 0,385 0,387 0,379 | 0,024 | 0,0201 | 0,352 | 0,385 | 0,448 |

Où : **SE Pred** : Erreur standard de la prédiction. **95 % PI Bas** : Limite inférieure de l'intervalle de prédiction à 95 %. **95 % PI Haut** : Limite supérieure de l'intervalle de prédiction à 95 %.

3. Validation de la méthode d'analyse

La validation d'une méthode analytique constitue une étape fondamentale pour assurer la fiabilité, la reproductibilité et la qualité des résultats obtenus [261]. Dans ce cadre, la méthode colorimétrique de dosage de l'aluminium par spectrophotométrie a fait l'objet d'une évaluation rigoureuse selon les recommandations des normes ISO/CEI 17025 [262,263] et NF V03-110 [264], spécifiques à la validation des méthodes analytiques.

- **Domaine d'évaluation**

La méthode a été conçue pour le dosage de l'aluminium dans les eaux destinées à la consommation humaine, incluant les eaux souterraines et les eaux de surfaces [265,266].

- **Description du protocole expérimental**

Le protocole expérimental a été établi sur la base des conditions optimales déterminées lors de l'étape d'optimisation de la méthode. Il se déroule selon les étapes suivantes :

- **Préparation de l'échantillon**

Dans une fiole jaugée de 25 mL, introduire 10 mL de l'échantillon d'eau à analyser. Ajouter successivement :

- 10 mL de tampon acétate de sodium/acide acétique ajusté à pH 4,5,
- 2 mL de la solution de Rouge d'Alizarine S,
- 2,5 mL de la solution de PVP 40.

Compléter le volume jusqu'au trait de jauge à l'aide d'eau ultrapure.

- **Développement du complexe coloré**

Laisser la solution réagir pendant 10 minutes à température ambiante, afin de permettre la formation optimale du complexe Aluminium–Rouge d'Alizarine.

- Mesure spectrophotométrique

Déterminer l'absorbance à 510 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible. Une courbe d'étalonnage est préalablement construite en traçant l'absorbance en fonction des concentrations de standards préparés à partir d'une solution mère d'aluminium. Cette courbe sert ensuite à déterminer la concentration d'aluminium dans les échantillons étudiés [113].

• Paramètres de validation étudiés

Les performances de la méthode ont été évaluées selon plusieurs critères : linéarité, répétabilité, fidélité intermédiaire et limite de quantification.

• Définition du domaine d'application

Des analyses préliminaires d'échantillons prélevés sur six mois ont permis de fixer le domaine d'application de la méthode entre 5 et 400 µg/L en aluminium.

• Limite d'acceptabilité

La limite d'acceptabilité d'une méthode est une valeur seuil globale exprimée sous forme de pourcentage. Elle varie selon les exigences de l'analyste ou la finalité de la procédure analytique [267]. En l'absence de références réglementaires, nous avons adopté une tolérance de $\pm 20\%$, valeur couramment utilisée dans les analyses d'eau potable.

• Intervalle de tolérance (β)

L'intervalle de tolérance représente la proportion de futurs résultats qui seront compris dans la plage définie. Nous avons fixé $\beta \geq 80\%$, seuil généralement recommandé en validation analytique [263].

• Échantillons et protocole de validation

- Choix des échantillons de validation

Pour estimer la justesse de la méthode, il faut disposer d'échantillons de validation dont la concentration est connue le plus exactement possible avec une incertitude connue [263]. Il existe plusieurs approches possibles parmi lesquelles nous avons choisi l'option de préparer des matrices réelles dopées avec l'analyte d'intérêt, l'aluminium, à partir d'un étalon de pureté connue [265]. Ce choix est justifié par la meilleure représentativité des matrices réelles par rapport aux solutions synthétiques.

- Préparation de la matrice

Afin de représenter au mieux la matrice « eaux destinées à la consommation humaine », un échantillon moyen a été réalisé en rassemblant des échantillons d'eau de robinet provenant de

différentes communes de la wilaya d'Annaba et des échantillons d'eau en bouteille. Ces échantillons ont été collectés en mois de novembre 2024. Au total, 24 échantillons à volumes égaux (12 litres) ont été homogénéisés dans un grand récipient en polyéthylène, préalablement rincé avec une solution d'acide nitrique diluée au 1/10^{ème}, pour éviter toute contamination résiduelle. Une quantité suffisante de la matrice a été acidifié à pH < 2 par l'acide nitrique, puis a été conservée pendant toute la durée des expériences de validation à +4°C.

- Choix du protocole de validation

Le plan d'expérience de validation sert à estimer, dans les conditions où le mode opératoire sera appliqué en routine, quelles seront les performances en routine de la méthode [263]. Les indications de la commission SFSTP Pharma recommandent l'utilisation dans le cas du dosage d'une substance chimique dans une matrice complexe, 3 niveaux au minimum. Nous avons également appliqué le protocole V4 [268]. Six niveaux de concentration ont été testés : 5, 10, 50, 100, 200, 400 µg/L. Le tableau suivant détaille le nombre de standards utilisés à chaque étape, ainsi que le nombre minimum de séries requis pour assurer la robustesse de l'évaluation.

Tableau 91. Nombre des standards d'étalonnage et de validation selon le protocole V4 [268].

| Standards | Nombre par niveau |
|-----------------------------------------|-------------------|
| Standards d'étalonnage sans la matrice | 2 |
| Standards de validation avec la matrice | 3 |
| Nombre minimum de séries | 3 |

- Organisation des essais de validation

Trois séries de mesures indépendantes ont été réalisées sur trois jours consécutifs, en distinguant deux types d'essais :

- **Standards d'étalonnage (sans matrice)**
 - ✓ 36 mesures au total (6 niveaux × 2 répétitions × 3 jours).
- **Standards de validation (avec matrice réelle dopée)**
 - ✓ 63 mesures réalisées (6 niveaux + 1 niveau blanc × 3 répétitions × 3 jours).
 - ✓ Échantillon non dopé a systématiquement été inclus pour estimer la concentration naturelle en aluminium dans la matrice.

Ces séries ont permis d'évaluer à la fois la justesse, la fidélité et l'exactitude de la méthode, en conditions proches de l'utilisation en routine.

- Préparation des standards d'étalonnage (sans matrice)

Les standards d'étalonnage sont préparés dans une série de fioles jaugées de 25 mL, selon le protocole suivant (Tableau 92) :

Tableau 92. Protocole expérimental : Standards d'étalonnage

| Numéro de fiole | T | I | II | III | IV | V | VI |
|----------------------------------------------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Solution de PVP40 à 1% (ml) | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Tampon acétate de sodium/acide acétique 0,1 M à pH 4,5 (ml) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Solution de Rouge d'Alizarine S à 0,18% (400 µmol/L dans 25 ml) (ml) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Solution étalon d'aluminium à 5 mg/L (µl) | 0 | 25 | 50 | 250 | 500 | 1000 | 2000 |
| Eau distillée q.s.p (ml) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Correspondances en µg d'Al/L | 0 | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 | 400 |

Après préparation, les solutions ont été homogénéisées, puis laissées au repos pendant 10 minutes à température ambiante pour permettre le développement du complexe coloré. La mesure de l'absorbance a été réalisée à 510 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible.

- Préparation des standards de validation (avec matrice)

Les standards de validation ont été préparés selon un protocole identique à celui des standards d'étalonnage, à la différence que l'eau distillée est remplacée en partie par une matrice naturelle représentative (eaux de robinet et embouteillées). Chaque fiole contient une quantité connue d'aluminium ajoutée à la matrice (Tableau 93).

Tableau 93. Protocole expérimental : Standards de validation

| Numéro de fiole | T | I | II | III | IV | V | VI |
|----------------------------------------------------------------------|-----|-------|------|------|-----|-----|-----|
| Matrice naturelle (eau) (ml) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Solution de PVP40 à 1% (ml) | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Tampon acétate de sodium/acide acétique 0,1 M à pH 4,5 (ml) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Solution de Rouge d'Alizarine S à 0,18% (400 µmol/L dans 25 ml) (ml) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Solution étalon d'aluminium à 5 mg/l (ml) | 0 | 0,025 | 0,05 | 0,25 | 0,5 | 1 | 2 |
| Eau distillée q.s.p (ml) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |

Comme pour les standards d'étalonnage, les solutions sont homogénéisées puis laissées au repos pendant 10 minutes à température ambiante. L'absorbance est ensuite mesurée à 510 nm. Cette préparation permet d'évaluer l'effet de la matrice naturelle sur la justesse et la fidélité des résultats.

- Calcul des concentrations prédites inverses

L'objectif de cette étape est d'évaluer les performances de la méthode de dosage en déterminant les concentrations d'aluminium retrouvées à partir des réponses spectrophotométriques observées. Cette procédure repose sur l'exploitation des modèles d'étalonnage par régression et l'application de la méthode de prédiction inverse

Étape 1 : Élaboration du modèle d'étalonnage

- Pour chaque série d'analyses, les données d'étalonnage sont modélisées en exprimant la réponse analytique (Y) en fonction de la concentration des standards (x), en ajustant un modèle mathématique commun à l'ensemble des séries (modèle quadratique).
- Les paramètres du modèle sont estimés par régression, en tenant compte des variations inter-séries (inter-journalières).
- Cette approche statistique permet une modélisation homogène de la relation entre signal et concentration, garantissant la cohérence de l'analyse [181, 186].

Étape 2 : Prédiction inverse des concentrations retrouvées

Les équations d'étalonnage obtenues sont inversées pour calculer les concentrations estimées à partir des valeurs d'absorbance observées.

- La formule appliquée est : $x = z = f^{-1}(Y)$
- Où z représente la concentration estimée en aluminium dans chaque échantillon analysé.

Cette démarche permet de comparer les concentrations théoriques aux concentrations retrouvées, afin de calculer les critères de validation tels que le biais, la fidélité, le taux de recouvrement, l'exactitude et l'erreur totale.

- Calcul des critères de validation [264]

L'évaluation globale de la performance de la méthode repose sur l'analyse statistique des concentrations retrouvées par prédiction inverse. Les critères retenus sont :

- **Biais absolu** : différence entre la concentration moyenne retrouvée et la concentration théorique.

- **Biais relatif (%)** : exprimé en pourcentage de la concentration théorique.
- **Taux de recouvrement (%)** : rapport entre la concentration retrouvée et la concentration théorique, exprimé en pourcentage.
- **Fidélité (variance totale)** : somme de la variance intra-série (répétabilité) et de la variance inter-série (intermédiaire).
- **Coefficient de variation (CV%)** : indicateur de dispersion des résultats autour de la moyenne.
- **Erreur totale (ET)** : indicateur global combinant biais et fidélité, estimé à partir des écarts-types et biais observés.

Les résultats obtenus pour chaque niveau de concentration permettent ainsi de caractériser la justesse, la précision et la robustesse de la méthode sur l'ensemble de la gamme analytique.

- Construction du profil d'exactitude [264]

Le profil d'exactitude constitue une représentation graphique de la performance analytique de la méthode en termes de justesse et de précision sur l'ensemble de la gamme de concentrations. Il permet de visualiser le respect des limites d'acceptabilité fixées et de déterminer les bornes de quantification valide.

- **Objectifs du profil d'exactitude**
 - Vérifier que, pour chaque niveau de concentration, les résultats expérimentaux se situent dans les limites d'acceptabilité définies (ici $\pm 20\%$).
 - Identifier l'intervalle de quantification valide, limité par les intersections entre les courbes de tolérance et les limites d'acceptabilité.
- **Données utilisées**

Les taux de recouvrement sont exprimés en pourcentage pour chaque niveau de concentration. Les concentrations moyennes issues des validations sont reportées en abscisse. Les courbes tracées incluent :

- Les limites d'acceptabilité supérieures (LAS) et inférieures (LAI),
- Les limites de tolérance calculées,
- Les biais observés (écarts entre valeurs retrouvées et théoriques).

- **Méthodologie de construction**

- Calcul des taux de recouvrement pour chaque niveau de concentration.
- Tracé du biais moyen et des limites de tolérance autour de ce biais.
- Superposition des limites d'acceptabilité pour déterminer l'adéquation du profil.
- Définition des limites de quantification :
 - ✓ **LLOQ** (Lower Limit of Quantification) : borne inférieure de quantification acceptable.
 - ✓ **ULOQ** (Upper Limit of Quantification) : borne supérieure de quantification acceptable.

- Estimation de l'incertitude [264]

L'estimation de l'incertitude de mesure permet de quantifier la fiabilité des résultats obtenus par la méthode. Elle est basée sur le calcul de l'erreur totale (ET), qui combine à la fois les contributions du biais et de la fidélité.

- **Méthodologie**

L'erreur totale est calculée pour chaque niveau de concentration à partir de la moyenne des concentrations retrouvées et de leur écart-type.

Les contributions intra-série et inter-série à la variance sont intégrées dans l'estimation globale. Les biais relatifs sont également pris en compte pour l'évaluation complète de l'incertitude.

3.1. Interférences

Selon les études de *Eder J. Santos & al.* et *J. Hernandez & al.* [113,251], des interférences peuvent survenir à partir de concentrations en fer et en cuivre supérieures ou égales à 1 mg/L. Or, notre étude porte sur des eaux destinées à la consommation humaine où la réglementation algérienne fixe 0,3 mg/L pour le fer et 2 mg/L pour le cuivre comme limites maximales de ces éléments dans l'eau du robinet ainsi que dans les eaux en bouteille (eaux minérales et de source) [269,270].

En tenant compte de l'effet de dilution dû aux réactifs, la concentration maximale en cuivre susceptible d'être atteinte dans un échantillon analysé est de 0,8 mg/L. Par conséquent, aucune interférence n'est attendue dans le cadre du domaine d'application de cette méthode.

Néanmoins, si des interférences de fer et de cuivre étaient détectées, elles pourraient être corrigées par l'ajout de complexants spécifiques : une solution d'acide ascorbique à 0,05 mol/L éliminer les interférences du fer et une solution de L-Histidine à 0,01 mol/L pour neutraliser les effets du cuivre.

3.2. Contrôle de l'étalonnage

Le contrôle de l'étalonnage constitue une étape essentielle pour assurer la fiabilité continue des mesures analytiques. Afin de garantir la stabilité du système et l'absence de dérive instrumentale, trois dispositifs de contrôle ont été mis en œuvre conformément aux exigences des normes ISO/CEI 17025 [263].

- **Points de la courbe d'étalonnage**

Pour chaque série d'analyses effectuée durant la journée, trois points de la courbe d'étalonnage ont été mesurés : la limite de quantification (5 µg/L), un point intermédiaire à 100 µg/L, et un point élevé à 400 µg/L. Ces points sont utilisés pour déterminer l'équation d'étalonnage, qui sert ensuite à calculer les concentrations des échantillons analysés (cf. Annexe 7).

- **Essais à blanc**

Des essais à blanc, incluant des blancs analytiques et instrumentaux, ont été réalisés à différentes étapes du protocole afin de vérifier l'absence de contamination croisée ou de bruit de fond significatif.

- **Mise en place d'une Carte de contrôle**

Une carte de contrôle a été mise en place pour surveiller la stabilité du système analytique et détecter toute dérive de la courbe d'étalonnage.

Le point de contrôle à 100 µg/L a été analysé après chaque série de 20 mesures, et les densités optiques obtenues ont été comparées aux limites d'acceptabilité établies ($\pm 10\%$). La ligne centrale de la carte correspond à la valeur théorique moyenne dérivée des mesures de calibration.

3.3. Résultats de la validation de la méthode

3.3.1. Standards d'étalonnage (sans matrice)

Les solutions de standards d'étalonnage ont été analysées pendant trois jours successifs, avec six (06) niveaux de concentration, chaque niveau a été répété deux fois (02), les concentrations introduites sont exprimées en µg/L (Tableau 94).

Tableau 94. Résultats obtenus pour les standards d'étalonnage.

| Niveau | Concentration (µg/L) | Réponse analytique (DO) | | |
|--------|----------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| | | Série n°1 | Série n°2 | Série n°3 |
| 1 | 5 | 0,038 | 0,040 | 0,039 |
| | 5 | 0,041 | 0,041 | 0,040 |
| 2 | 10 | 0,055 | 0,052 | 0,049 |
| | 10 | 0,053 | 0,050 | 0,053 |
| 3 | 50 | 0,183 | 0,181 | 0,182 |
| | 50 | 0,190 | 0,198 | 0,194 |
| 4 | 100 | 0,369 | 0,378 | 0,364 |
| | 100 | 0,376 | 0,378 | 0,376 |
| 5 | 200 | 0,705 | 0,707 | 0,692 |
| | 200 | 0,715 | 0,709 | 0,715 |
| 6 | 400 | 1,304 | 1,286 | 1,287 |
| | 400 | 1,301 | 1,310 | 1,302 |

3.3.2. Standards de validation (avec matrice)

Les solutions de standards de validation ont été analysées selon les mêmes conditions que celles des solutions d'étalonnage. Six (06) concentrations ont été préparées avec trois essais par niveau auxquelles nous avons ajouté un niveau « 0 », sans matrice.

Le Tableau 95 présente les résultats obtenus pour ces standards de validation.

Tableau 95. Résultats obtenus pour les standards de validation.

| Niveau | Concentration (µg/L) | Réponse analytique (DO) | | |
|--------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| | | Série n°1 | Série n°2 | Série n°3 |
| 0 | 0 | 0,079 | 0,081 | 0,078 |
| | 0 | 0,080 | 0,081 | 0,088 |
| | 0 | 0,078 | 0,082 | 0,081 |
| 1 | 5 | 0,097 | 0,101 | 0,098 |
| | 5 | 0,099 | 0,098 | 0,103 |
| | 5 | 0,100 | 0,096 | 0,099 |
| 2 | 10 | 0,117 | 0,118 | 0,116 |
| | 10 | 0,116 | 0,115 | 0,118 |
| | 10 | 0,116 | 0,117 | 0,115 |
| 3 | 50 | 0,262 | 0,257 | 0,269 |
| | 50 | 0,257 | 0,285 | 0,277 |
| | 50 | 0,260 | 0,267 | 0,255 |
| 4 | 100 | 0,441 | 0,438 | 0,433 |
| | 100 | 0,440 | 0,451 | 0,440 |
| | 100 | 0,445 | 0,449 | 0,439 |
| 5 | 200 | 0,820 | 0,805 | 0,799 |
| | 200 | 0,799 | 0,825 | 0,794 |
| | 200 | 0,818 | 0,821 | 0,777 |
| 6 | 400 | 1,487 | 1,475 | 1,491 |
| | 400 | 1,482 | 1,513 | 1,439 |
| | 400 | 1,488 | 1,485 | 1,399 |

3.3.3. Analyse de la fonction de réponse (gamme d'étalonnage)

- **Choix du modèle de régression**

A partir des données de la gamme des standards d'étalonnage, plusieurs modèles de calibration ont été générés dans le but d'identifier le modèle le plus approprié. Le modèle choisi est une régression quadratique de la forme $Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$.

Les paramètres des fonctions de réponse obtenues pour les trois jours d'analyse sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 96. Paramètres des fonctions de réponse

| Paramètre | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| a | $-1,16 \times 10^{-6}$ | $-1,25 \times 10^{-6}$ | $-1,14 \times 10^{-6}$ |
| b | $3,68 \times 10^{-3}$ | $3,70 \times 10^{-3}$ | $3,65 \times 10^{-3}$ |
| c | $1,56 \times 10^{-2}$ | $1,58 \times 10^{-2}$ | $1,55 \times 10^{-2}$ |
| Écart-type (SE) | $6,88 \times 10^{-4}$ | $8,81 \times 10^{-2}$ | $8,95 \times 10^{-2}$ |
| r | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| r² | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| r² ajusté | 0,999 | 0,999 | 0,999 |

- **ANOVA**

Tableau 97. Analyse de variance (ANOVA)

| Source de variation | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Régression (SCE) | 2,389 | 2,370 | 2,359 |
| Résiduelle (SCE) | $4,26 \times 10^{-4}$ | $6,98 \times 10^{-4}$ | $7,21 \times 10^{-4}$ |
| Totale (SCE) | 2,389 | 2,371 | 2,359 |
| Régression (ddl) | 2 | 2 | 2 |
| Résiduelle (ddl) | 9 | 9 | 9 |
| Totale (ddl) | 11 | 11 | 11 |
| Régression (MS) | 1,194 | 1,185 | 1,179 |
| Résiduelle (MS) | $4,74 \times 10^{-5}$ | $7,77 \times 10^{-5}$ | $8,02 \times 10^{-5}$ |
| F | 25185,232 | 15261,851 | 14714,387 |
| F Critique (0,05 ; 2 ; 9) | 4,256 | 4,256 | 4,256 |
| p-value | $1,10 \times 10^{-16}$ | $1,10 \times 10^{-16}$ | $1,10 \times 10^{-16}$ |

L'ANOVA réalisée montre que le modèle est valide : la variation observée dans les données est statistiquement significative ($p\text{-value} < 0,05$) et les valeurs de F calculées pour les trois jours dépassent largement la valeur critique de F (0,05 ; 2 ; 9) (Tableau 97).

- **Validité des courbes**

Le Tableau 98 présente les résultats des différents critères statistiques utilisés pour évaluer la validité des courbes établies

Tableau 98. Validité des courbes

| Source de variation | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
|----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Erreur expérimentale (SCE) | $1,1 \times 10^{-4}$ | $4,37 \times 10^{-4}$ | $5,29 \times 10^{-4}$ |
| Manque d'ajustement (SCE) | $3,169 \times 10^{-4}$ | $2,61 \times 10^{-4}$ | $1,92 \times 10^{-4}$ |
| Erreur totale (SCE) | $4,26 \times 10^{-4}$ | $6,98 \times 10^{-4}$ | $7,21 \times 10^{-4}$ |
| Erreur pure (ddl) | 6 | 6 | 6 |
| Manque d'ajustement (ddl) | 3 | 3 | 3 |
| Erreur pure (MS) | $1,83 \times 10^{-5}$ | $7,28 \times 10^{-5}$ | $8,83 \times 10^{-5}$ |
| Manque d'ajustement (MS) | $1,05 \times 10^{-4}$ | $8,73 \times 10^{-5}$ | $6,40 \times 10^{-5}$ |
| F | 5,762 | 1,198 | 0,725 |
| F Critique (0,05 ; 3 ; 6) | 4,757 | 4,757 | 4,757 |
| p-value | 0,033 | 0,387 | 0,572 |
| Conclusion | Non valide | Valide | Valide |

La validité des courbes a été vérifiée en comparant les erreurs expérimentales et les erreurs de régression.

- **Homogénéité des variances**

Tableau 99. Homogénéité des variances

| Jour | Cochran C° | Limite (C) (0,05 ; 6 ; 1) | Conclusion |
|--------|------------|---------------------------|------------|
| Jour 1 | 0,454 | 0,780 | Homogène |
| Jour 2 | 0,659 | 0,780 | Homogène |
| Jour 3 | 0,499 | 0,780 | Homogène |

- Analyse des résidus

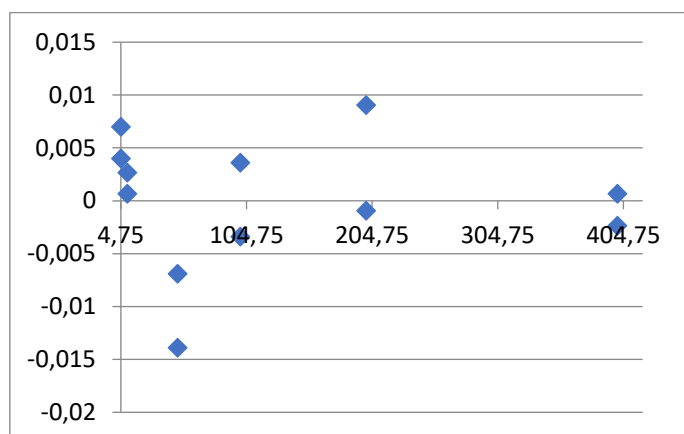


Figure 72. Distribution des résidus en fonction des concentrations réelles (Jour1)

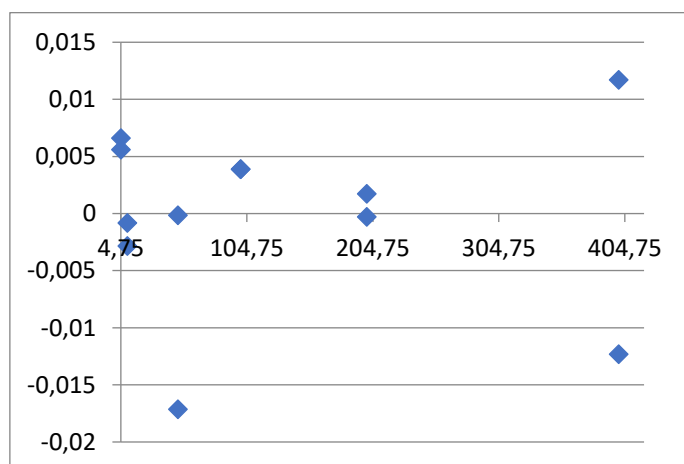


Figure 73. Distribution des résidus en fonction des concentrations réelles (Jour2)

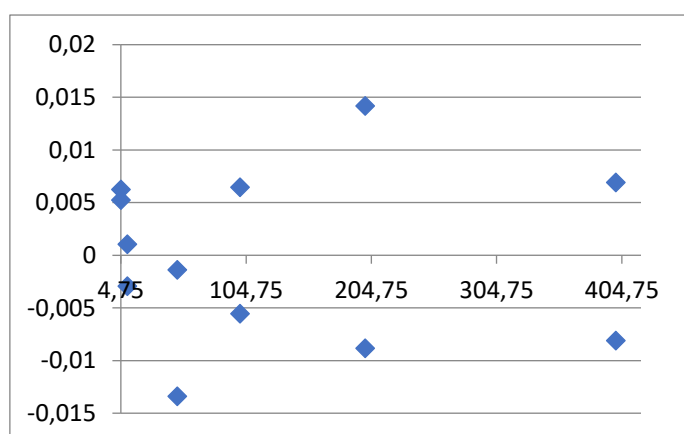


Figure 74. Distribution des résidus en fonction des concentrations réelles (Jour3)

Les graphiques ci-dessus (Figures 72 à 74) présentent la distribution des résidus pour les trois journées d'analyse. La répartition homogène et aléatoire des résidus autour de zéro confirme la précision et la fiabilité du modèle choisi.

3.3.4. Analyse de la fonction de réponse (gamme de validation)

- **Choix du modèle de régression**

Le même modèle statistique utilisé pour la gamme d'étalonnage a été appliqué ici.

Tableau 100. Paramètres des fonctions de réponse

| Paramètre | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| a | $-5,78 \times 10^{-7}$ | $-6,42 \times 10^{-7}$ | $-5,93 \times 10^{-7}$ |
| b | $3,61 \times 10^{-3}$ | $3,56 \times 10^{-3}$ | $3,51 \times 10^{-3}$ |
| c | $7,94 \times 10^{-2}$ | $8,12 \times 10^{-2}$ | $8,04 \times 10^{-2}$ |
| Ecart-type (SE) | $5,63 \times 10^{-3}$ | $8,91 \times 10^{-3}$ | $1,45 \times 10^{-2}$ |
| r | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| r² | 0,999 | 0,999 | 0,998 |
| r² ajusté | 0,999 | 0,999 | 0,998 |

Les coefficients de corrélation ($r > 0,99$) et les coefficients de détermination ajustés (r^2 ajusté $> 0,998$) confirment que le modèle est adéquat pour représenter fidèlement la gamme de validation (Tableau 100).

- **ANOVA**

Tableau 101. Analyse de variance (ANOVA)

| Source de variation (SCE) | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Régression | 4,828 | 4,852 | 4,50 |
| Résiduelle | $6,32 \times 10^{-4}$ | $1,73 \times 10^{-3}$ | $4,98 \times 10^{-3}$ |
| Totale | 4,829 | 4,853 | 4,514 |
| ddl | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
| Régression | 2 | 2 | 2 |
| Résiduelle | 18 | 18 | 18 |
| Totale | 20 | 20 | 20 |
| Variances (MS) | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
| Régression | 2,414 | 2,426 | 2,254 |
| Résiduelle | $3,51 \times 10^{-5}$ | $9,66 \times 10^{-5}$ | $2,76 \times 10^{-4}$ |
| F | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
| F calculée | 68701,724 | 25115,410 | 8140,835 |
| F critique (0,05 ; 2 ; 18) | 3,554 | 3,554 | 3,554 |
| p-value | $< 0,0001$ | $< 0,0001$ | $< 0,0001$ |

L'analyse de variance (ANOVA) présentée dans le Tableau 101 confirme la validité statistique du modèle de régression pour les trois jours d'analyse. La p-value est largement inférieure à 0,05, et les valeurs de F très largement supérieures à la valeur critique confirment la significativité du modèle de régression.

- **Validité des courbes**

Tableau 102. Validité des courbes

| Source de variation (SCE) | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
|-----------------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Erreur expérimentale (Erreur pure) | $3,23 \times 10^{-4}$ | $1,52 \times 10^{-3}$ | $4,87 \times 10^{-3}$ |
| Erreur de la régression (Manque d'ajustement) | $3,09 \times 10^{-4}$ | $2,20 \times 10^{-4}$ | $1,15 \times 10^{-4}$ |
| Erreur totale | $6,325 \times 10^{-4}$ | $1,74 \times 10^{-3}$ | $4,98 \times 10^{-3}$ |
| ddl | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
| Erreur expérimentale (Erreur pure) | 14 | 14 | 14 |
| Erreur de la régression (Manque d'ajustement) | 4 | 4 | 4 |
| Variances (MS) | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
| Erreur expérimentale (Erreur pure) | $2,31 \times 10^{-5}$ | 0,0001 | 0,0003 |
| Erreur de la régression (Manque d'ajustement) | $7,73 \times 10^{-5}$ | $5,50 \times 10^{-5}$ | $2,89 \times 10^{-5}$ |
| F | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
| F calculée | 3,347 | 0,507 | 0,0830 |
| F critique (0,05 ; 4 ; 14) | 3,112 | 3,112 | 3,112 |
| p-value | 0,0403 | 0,731 | 0,986 |
| Conclusion | Courbe non valide | Courbe valide | Courbe valide |

Malgré la non-validité de la courbe du Jour 1, les courbes des Jours 2 et 3 confirment la robustesse du modèle pour les analyses suivantes (Tableau 102).

- **Homogénéité des variances**

Tableau 103. Homogénéité des variances

| Homogénéité des variances | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
|---------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Cochran C° | 0,83 | 0,511 | 0,874 |
| C (0,05 ; 7 ; 2) | 0,561 | 0,56 | 0,561 |
| Conclusion | Variances non homogènes | Variances homogènes | Variances non homogènes |

Nous avons constaté une hétérogénéité des variances observée pour deux jours, malgré cela, l'analyse des variances homogènes du Jour 2 montre que les résultats peuvent être utilisés comme indicateurs fiables pour le modèle (Tableau 103).

- **Analyse des résidus**

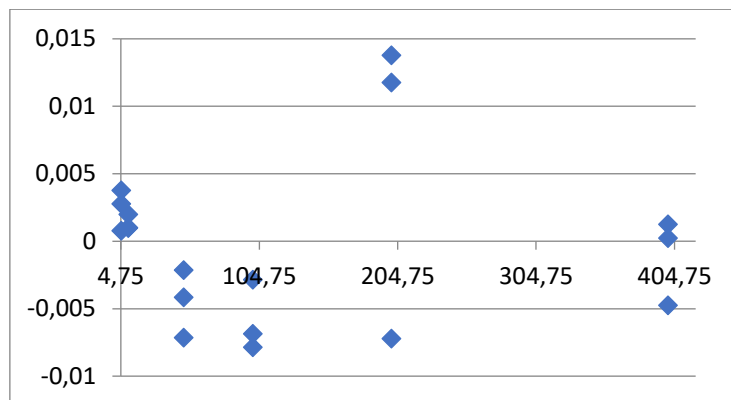


Figure 75. Résidus en fonction des concentrations réelles - Jour 1

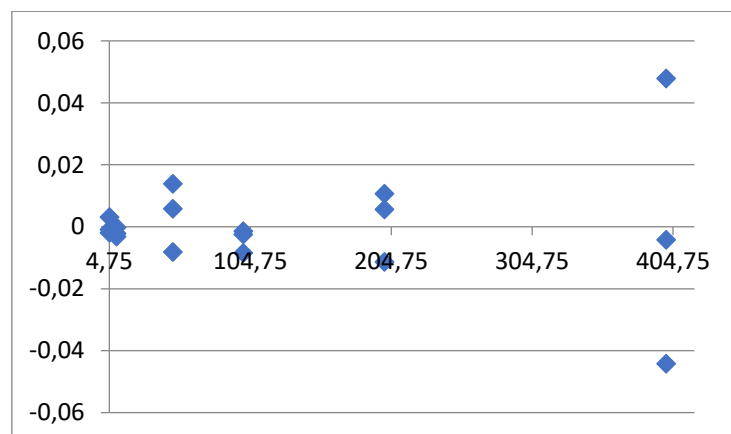


Figure 76. Résidus en fonction des concentrations réelles - Jour 2

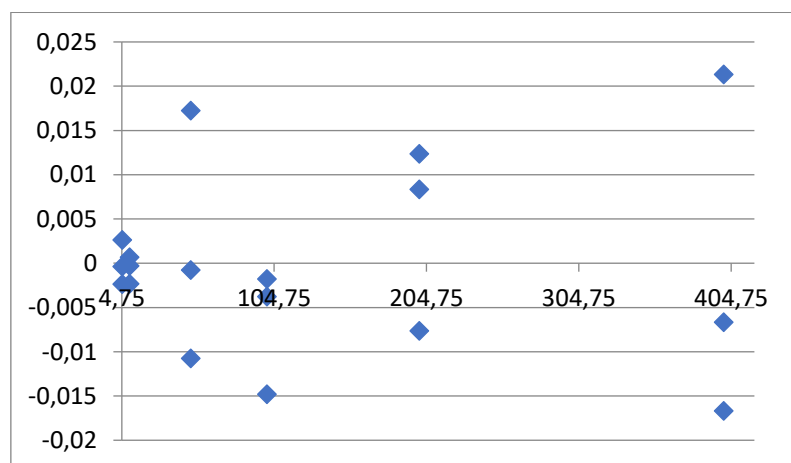


Figure 77. Résidus en fonction des concentrations réelles - Jour 3

Les graphes confirment une distribution aléatoire des résidus autour de zéro, nous pouvons constater ainsi, l'absence de biais systématique (Figures 75 à 77).

3.3.5. Prédiction inverse des concentrations

Après avoir généré le modèle mathématique, les concentrations obtenues par prédiction inverse sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 104. Concentrations obtenues par prédiction inverse.

| Niveau C % | C théorique | Jour 1 | Jour 2 | Jour 3 |
|------------|-------------|---------|---------|---------|
| 2,5 | 5 | 4,947 | 5,378 | 4,342 |
| 2,5 | 5 | 5,498 | 4,556 | 5,731 |
| 2,5 | 5 | 5,774 | 4,009 | 4,620 |
| 5 | 10 | 10,463 | 10,043 | 9,347 |
| 5 | 10 | 10,187 | 9,219 | 9,904 |
| 5 | 10 | 10,187 | 9,768 | 9,068 |
| 25 | 50 | 51,054 | 48,767 | 52,545 |
| 25 | 50 | 49,637 | 56,697 | 54,837 |
| 25 | 50 | 50,487 | 51,594 | 48,542 |
| 50 | 100 | 102,712 | 100,844 | 100,242 |
| 50 | 100 | 102,419 | 104,661 | 102,312 |
| 50 | 100 | 103,888 | 104,073 | 102,017 |
| 100 | 200 | 218,596 | 213,095 | 212,643 |
| 100 | 200 | 211,916 | 219,504 | 211,046 |
| 100 | 200 | 217,958 | 218,220 | 205,628 |
| 200 | 400 | 451,352 | 449,694 | 455,259 |
| 200 | 400 | 449,427 | 464,797 | 435,251 |
| 200 | 400 | 451,738 | 453,647 | 420,093 |

Remarque : Ces concentrations prédites ont été obtenues après la soustraction de la valeur du blanc (matrice seule sans étalon) de la concentration obtenue de l'échantillon contenant l'étalon, selon cette relation :

$$[C] \text{ prédite} = [C] \text{ obtenue} - [C] \text{ blanc}$$

Ce tableau présente les moyennes des concentrations en aluminium prédites par le modèle de régression pour chacun des trois jours d'analyse.

Tableau 105. Moyennes des concentrations prédites par jour

| C. Initiale µg/L | Moyenne Jour 1 µg/L | Moyenne Jour 2 µg/L | Moyenne Jour 3 µg/L |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 5 | 05,406 | 04,648 | 04,898 |
| 10 | 10,279 | 09,677 | 09,440 |
| 50 | 50,393 | 52,352 | 51,975 |
| 100 | 103,006 | 103,193 | 101,524 |
| 200 | 216,157 | 216,940 | 209,773 |
| 400 | 450,839 | 456,046 | 436,869 |

- **Calcul des critères de validation**

L'estimation de la justesse, de la fidélité et de l'erreur totale de la méthode s'effectue avec les concentrations calculées provenant des séries de validation pour chaque niveau de concentration (Tableau 106).

Tableau 106. Critères de validations en utilisant le modèle $Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$.

| Concentration en µg/L | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 | 400 |
|----------------------------------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Moyenne générale | 04,984 | 09,799 | 51,574 | 102,575 | 214,29 | 447,918 |
| Variance générale | 00,410 | 00,236 | 07,514 | 02,148 | 21,243 | 167,263 |
| MSM | 00,449 | 00,562 | 03,243 | 02,510 | 46,368 | 295,060 |
| MSE | 00,397 | 00,128 | 08,938 | 02,027 | 12,868 | 124,664 |
| Biais absolu | -00,016 | -00,201 | 01,574 | 02,575 | 14,290 | 47,918 |
| Biais relatif (%) | -00,313 | -02,009 | 03,148 | 02,575 | 07,145 | 11,980 |
| Recouvrement (%) | 99,687 | 97,991 | 103,148 | 102,575 | 107,145 | 111,980 |
| Var intra | 00,397 | 00,128 | 07,514 | 02,027 | 12,868 | 124,664 |
| Var inter | 00,017 | 00,145 | 00,000 | 00,161 | 11,167 | 56,799 |
| Var fidélité | 00,414 | 00,272 | 07,514 | 02,188 | 24,035 | 181,462 |
| CV répétabilité | 12,646 | 03,644 | 05,315 | 01,388 | 01,674 | 02,493 |
| CV fidélité | 12,915 | 05,326 | 05,315 | 01,442 | 02,288 | 03,007 |
| R | 00,043 | 01,136 | 0,000 | 00,079 | 00,868 | 00,456 |
| B | 00,961 | 00,696 | 01,000 | 00,934 | 00,72 | 00,784 |
| ddl | 07,508 | 03,956 | 07,714 | 07,317 | 04,386 | 05,499 |
| t-Student | 01,415 | 01,638 | 01,415 | 01,415 | 01,533 | 01,476 |
| Min | -19,654 | -11,680 | 0-4,779 | 00,408 | 03,280 | 07,157 |
| Max | 19,028 | 07,662 | 11,075 | 04,741 | 11,010 | 16,802 |
| Erreur totale | 13,228 | 07,335 | 08,463 | 04,017 | 09,433 | 14,987 |

3.3.6. Etablissement du profil d'exactitude

La limite d'acceptation est fixée à $\pm 20\%$ dans le cas de matrices complexes. Les résultats du profil d'exactitude sont présentés dans le Tableau 107.

Tableau 107. Profils d'exactitude en utilisant le modèle $Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$.

| Niveaux En % | LAI | Min | Biais % | Max | LAS |
|-----------------|-----|---------|---------|--------|-----|
| 2,5 | -20 | -19,654 | -00,313 | 19,028 | 20 |
| 5 | -20 | -11,68 | -02,009 | 07,662 | 20 |
| 25 | -20 | -04,779 | 03,148 | 11,075 | 20 |
| 50 | -20 | 00,408 | 02,575 | 04,741 | 20 |
| 100 | -20 | 03,280 | 07,145 | 11,010 | 20 |
| 200 | -20 | 07,156 | 11,980 | 16,802 | 20 |

Le profil d'exactitude de la méthode a été établi afin d'évaluer la performance analytique en termes de biais, de précision, et de limites d'acceptabilité. Il s'obtient en reliant d'une part les bornes des limites supérieures entre elles et d'autre part les bornes des limites inférieures entre elles. Le profil d'exactitude est présenté dans la figure suivante :

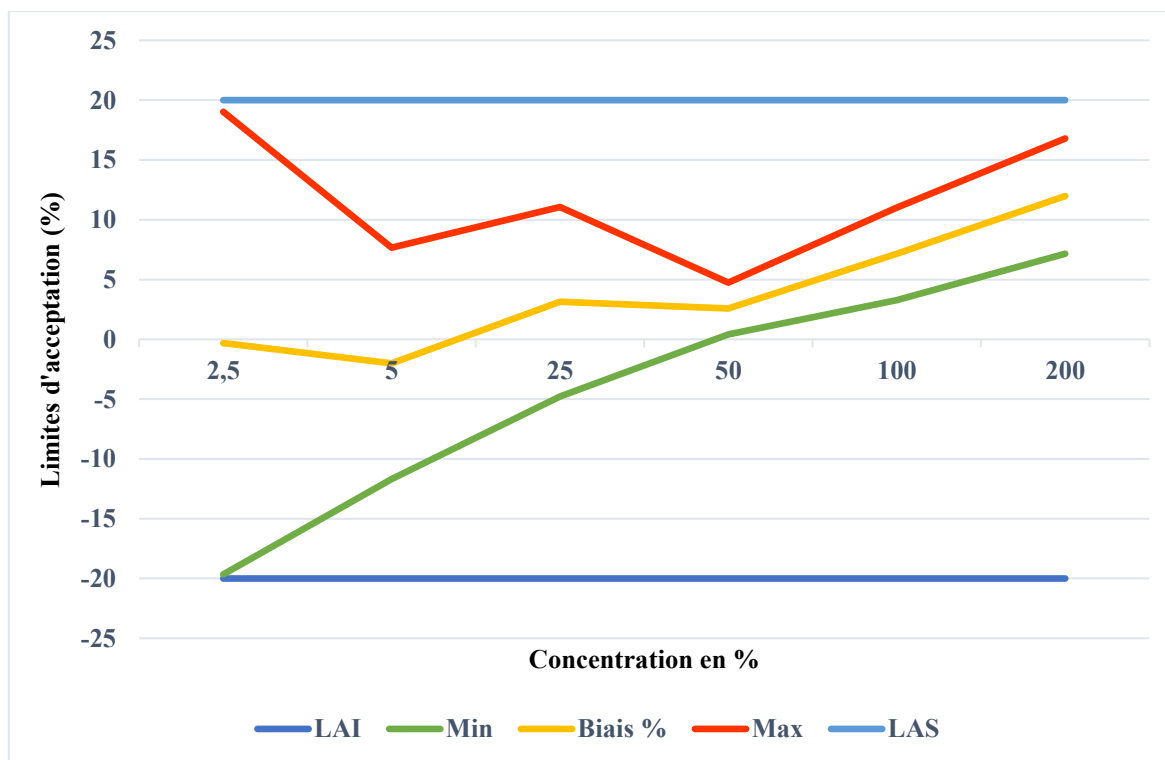


Figure 78. Profil d'exactitude en utilisant le modèle $Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$.

- **Limites de quantification basses (LLOQ) et hautes (ULOQ)**

L'intersection entre le profil d'exactitude et les limites d'acceptation (-20 ; +20) définissent les limites de quantification basse (LLOQ) et haute (ULOQ) de la procédure. Entre ces deux limites, il y a bien sûr l'intervalle de dosage. De la sorte, les limites de quantification sont bien les valeurs extrêmes qui peuvent être quantifiées avec une exactitude définie.

Pour ce modèle $Y = a.x^2 + b.x + c$, les limites de quantification basse (LLOQ) et haute (ULOQ) sont respectivement de l'ordre de 5 µg/L et 400 µg/L.

3.3.7. Estimation de l'incertitude

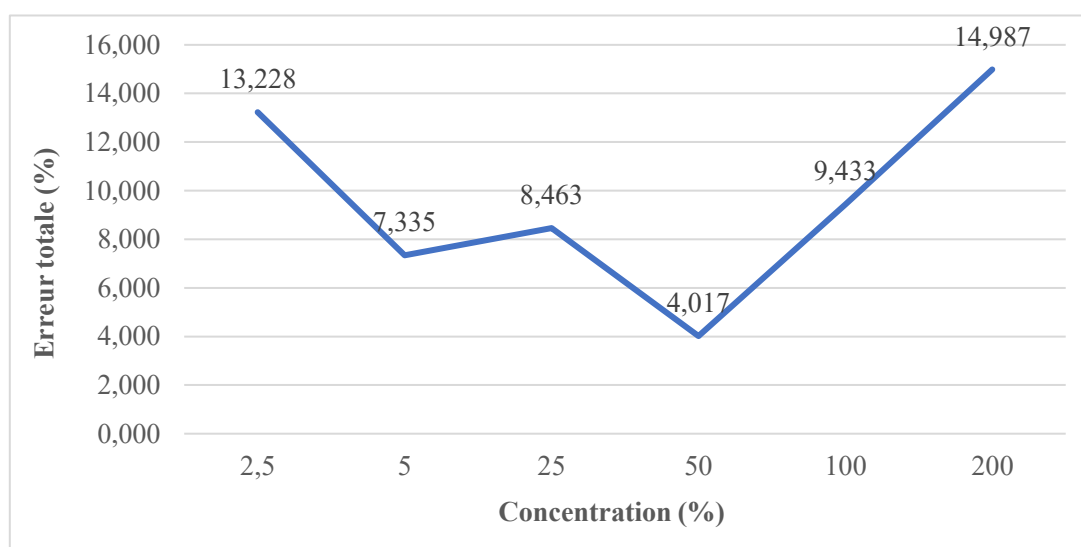


Figure 79. Représentation graphique des erreurs totales

La Figure ci-dessus illustre les erreurs totales entre les concentrations prédites par le modèle et les concentrations expérimentales mesurées.

- L'erreur totale varie selon les niveaux de concentration, allant de 4,02 µg/L (niveau 50 %) à 14,99 µg/L (niveau 200 %).
- Les niveaux intermédiaires (25 %, 50 %, 100 %) présentent une variabilité plus faible, reflétant la stabilité de la méthode dans cette plage.
- Les niveaux extrêmes (2,5 % et 200 %) montrent une incertitude plus élevée, ce qui est attendu aux extrémités de la gamme de calibration.

Cette analyse démontre que la méthode offre une précision acceptable et reproductible dans les conditions testées, et que les incertitudes associées restent compatibles avec les exigences analytiques relatives à l'eau de consommation.

3.3.8. Evaluation de la linéarité de la méthode

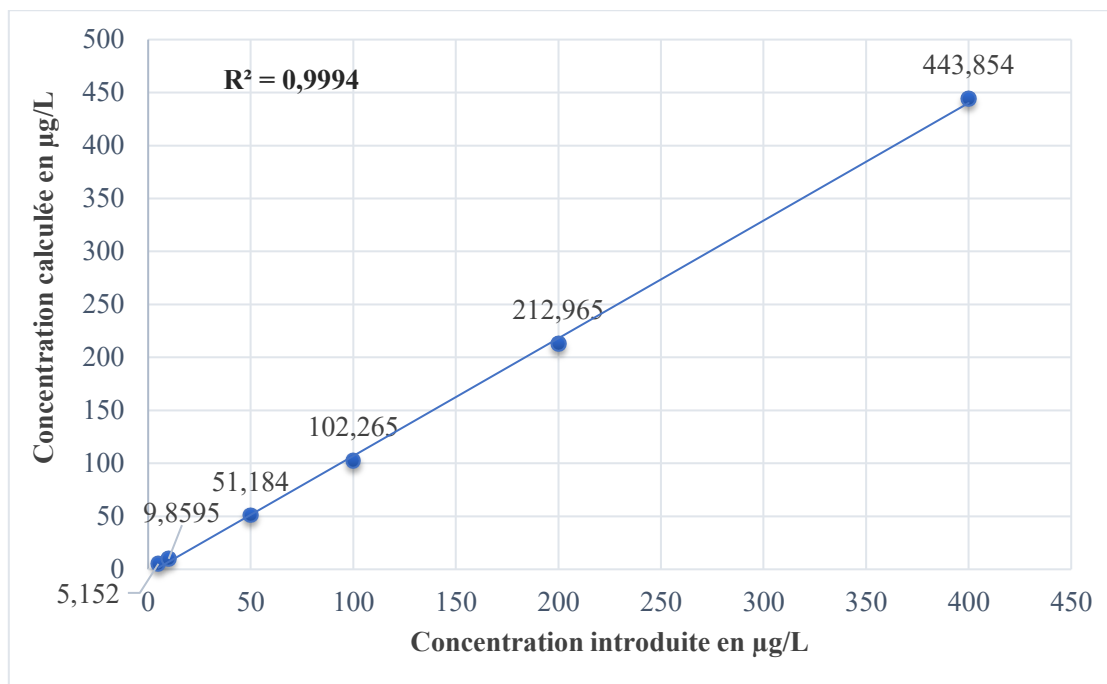


Figure 80. Linéarité de la méthode.

Ce graphique présente l'ajustement des concentrations mesurées en fonction des concentrations introduites, selon un modèle quadratique appliqué aux séries de validation.

Le coefficient de détermination très élevé ($R^2 = 0,9994$) atteste de la qualité de l'ajustement, confirmant la pertinence de ce modèle pour décrire la réponse analytique sur toute la gamme de concentrations testées (5 à 400 $\mu\text{g/L}$). Le recours à une fonction polynomiale de degré 2 a permis de mieux prendre en compte les éventuelles non-linéarités aux extrémités de la courbe, assurant ainsi une meilleure fidélité et une plus grande robustesse du modèle de calibrage comparé à un ajustement linéaire simple.

3.3.9. Contrôle de l'étalonnage

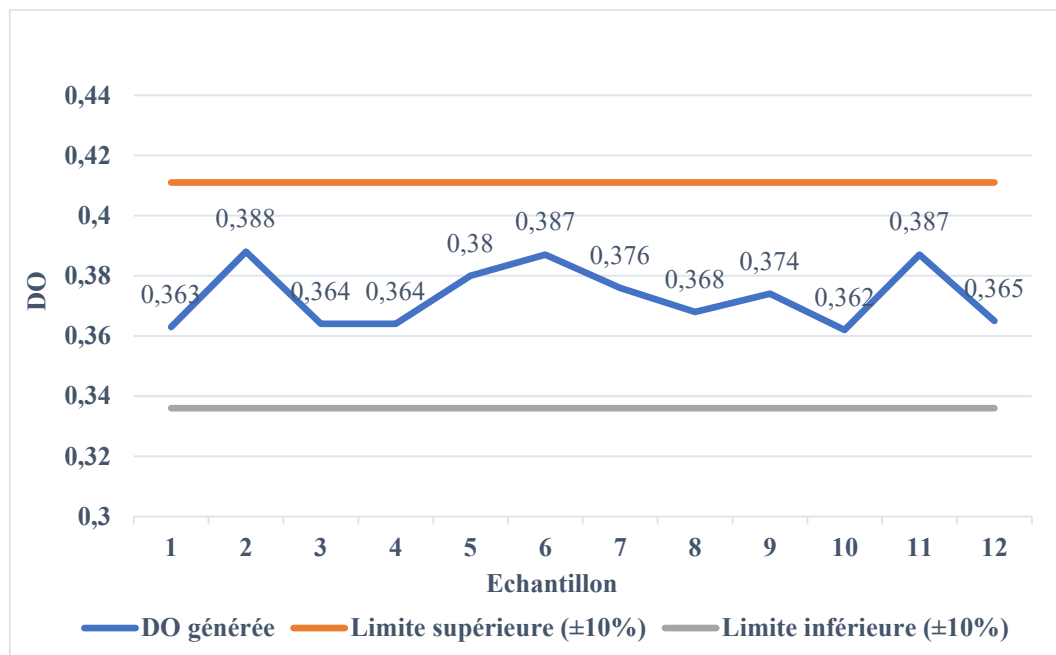


Figure 81. Carte de contrôle.

Les résultats de la carte de contrôle montrent que toutes les valeurs restent dans les limites définies, ce qui confirme l'absence de dérive significative du système pendant l'analyse (Figure 81).

4. Dosage de l'aluminium et Calcul de la Dose Hebdomadaire Ingérée (DHI) issue de l'eau

4.1. Méthodologie

La teneur en aluminium a été déterminée dans les échantillons d'eau en utilisant la méthode au rouge d'alizarine S, validée au sein de notre laboratoire.

La Dose Hebdomadaire Ingérée (DHI) a ensuite été estimée sur la base de l'apport quotidien en eau utilisée pour la reconstitution des biberons, en tenant compte de l'âge et du poids moyen des nourrissons, conformément aux données détaillées au chapitre II.

Le calcul repose sur trois éléments :

- Le volume de consommation journalier estimé à partir du nombre moyen de biberons consommés par jour et du volume unitaire de chaque biberon ;
- La concentration en aluminium mesurée dans les différents types d'eau ;

- Le calcul de l'apport hebdomadaire selon la formule suivante :

$$DHI\ eau = \frac{C \times V \times 7}{P}$$

Avec :

- **C** : concentration en aluminium ($\mu\text{g/L}$).
- **V** : volume total d'eau consommé quotidiennement (L/jour).
- **P** : poids corporel moyen du nourrisson (kg).

4.2. Critères d'évaluation

Les critères de jugement adoptés dans cette étude sont les suivants :

- Comparer les concentrations d'aluminium mesurées aux normes de potabilité définies par la réglementation algérienne et par l'OMS (0,2 mg/L), pour l'eau du robinet, les eaux de source et les eaux minérales naturelles (cf. annexe 12) ;
- Evaluer la conformité des valeurs de DHI obtenues par rapport à la Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) fixée par l'EFSA et l'OMS, soit ≤ 1 mg/kg/semaine.

4.3. Analyse des données

Les données recueillies ont été organisées dans un tableau Excel (version 2021) puis analysées à l'aide du logiciel SPSS (version 27). Une analyse statistique complète a été réalisée, comprenant :

- Des statistiques descriptives pour caractériser la distribution des teneurs en aluminium dans les différents types d'eau ;
- Des tests comparatifs pour identifier les différences significatives entre les groupes d'échantillons.

Le seuil de signification statistique a été fixé à $p < 0,05$, avec un intervalle de confiance de 95 %, afin d'assurer la robustesse et la fiabilité des résultats obtenus.

5. Résultats

5.1. Caractéristiques des échantillons étudiés

5.1.1. Répartition selon le type de l'eau

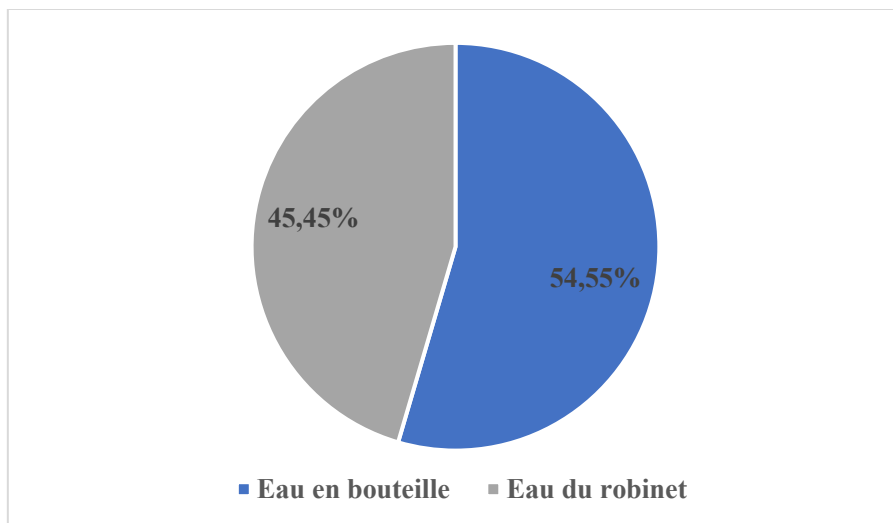


Figure 82. Répartition des échantillons analysés selon le type d'eau.

Ce graphe présente la répartition des échantillons d'eau analysés dans le cadre de l'étude sur la qualité des eaux utilisées pour la préparation des biberons dans la wilaya d'Annaba. L'échantillonnage a compris 36 échantillons d'eau en bouteille (54,5 %) et 30 échantillons d'eau du robinet (45,5 %).

5.1.2. Caractéristiques des eaux en bouteille

- Répartition selon la nature

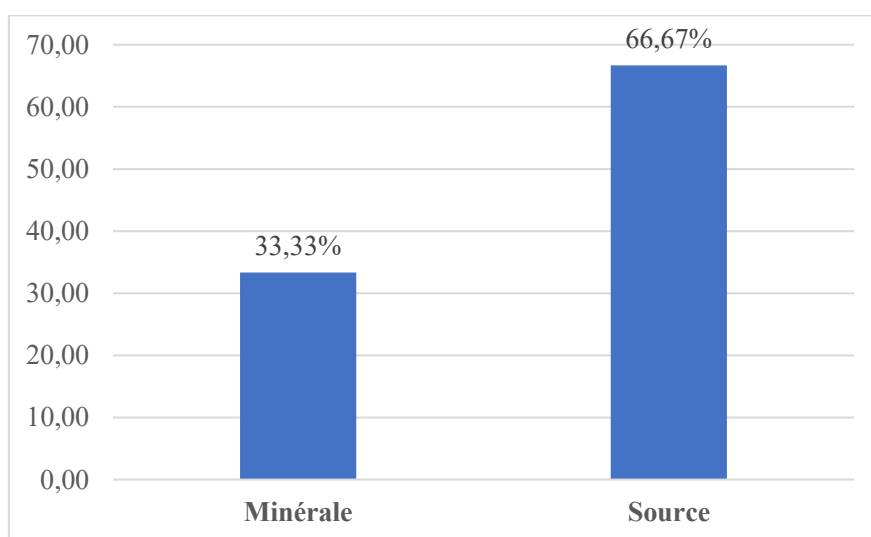


Figure 83. Répartition des eaux conditionnées analysées selon leur type.

Ce graphique montre que parmi les échantillons d'eaux conditionnées analysées, 66,67 % sont des eaux de source et 33,33 % des eaux minérales.

- **Répartition selon le bassin hydrographique**

En se basant sur la classification hydrographique proposée par *A. Hazzab*, les échantillons d'eaux conditionnées ont été répartis selon leur bassin de provenance [271]. Cette démarche vise à analyser la variabilité géographique des concentrations en aluminium. La figure suivante présente la répartition des échantillons en fonction de cette classification

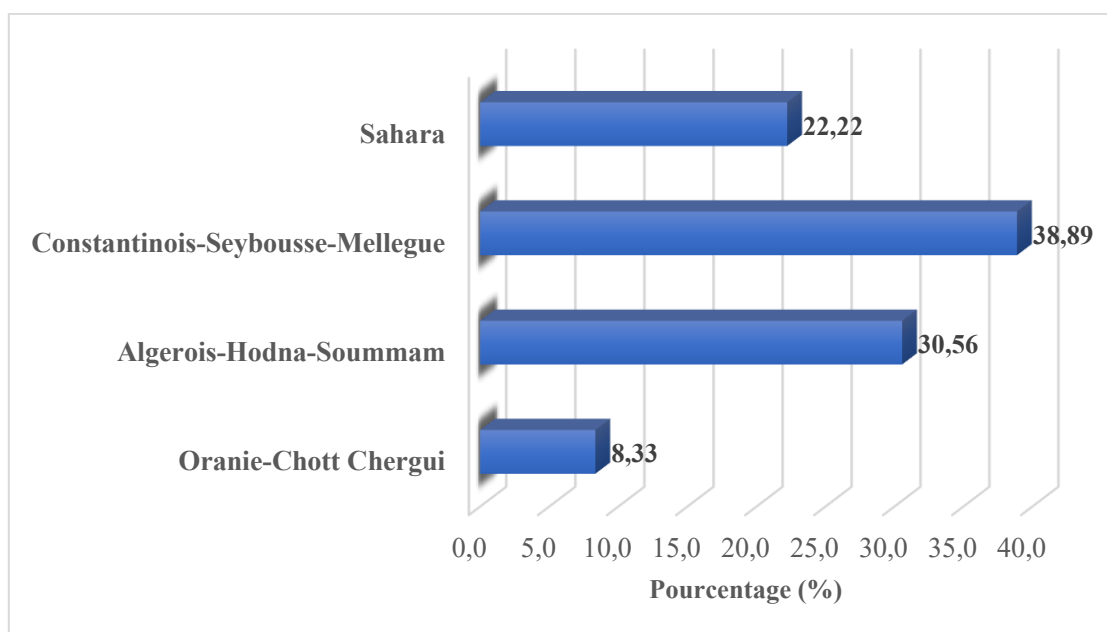


Figure 84. Répartition des eaux conditionnées analysées selon le bassin hydrographique.

Parmi les 36 échantillons d'eau en bouteille :

- 38,89 % proviennent du bassin Constantinois-Seybousse-Mellegue, ce qui représente la plus grande proportion des eaux conditionnées analysées.
- 30,56 % proviennent du bassin Algérois-Hodna-Soummam.
- 22,22 % proviennent du bassin Sahara.
- 8,33 % seulement sont issues du bassin Oranie-Chott Chergui.

5.1.3. Caractéristiques des eaux du robinet

- Répartition selon les communes

Tableau 108. Classification des eaux du robinet selon la commune.

| Commune | Fréquence |
|------------------|------------------|
| Annaba | 6 |
| Chetaibi | 2 |
| Tréat | 1 |
| Séraïdi | 3 |
| El Bouni | 5 |
| El Hadjar | 3 |
| Sidi Amar | 3 |
| Ain Berda | 2 |
| Cheurfa | 1 |
| Eulma | 1 |
| Berrahal | 2 |
| Oued Aneb | 1 |
| Total | 30 |

Le tableau 108 montre la répartition des échantillons d'eau du robinet analysés selon leur commune d'origine dans la wilaya d'Annaba. Les résultats indiquent que :

- La commune d'Annaba représente le plus grand nombre d'échantillons (6), suivie d'El Bouni (5).
- Les communes de Seraïdi, El Hadjar et Sidi Amar comptent également chacune 3 échantillons.
- D'autres communes, comme Tréat, Cheurfa, Eulma et Oued Aneb, sont représentées par un seul échantillon chacune.

- Répartition selon l'origine de l'eau

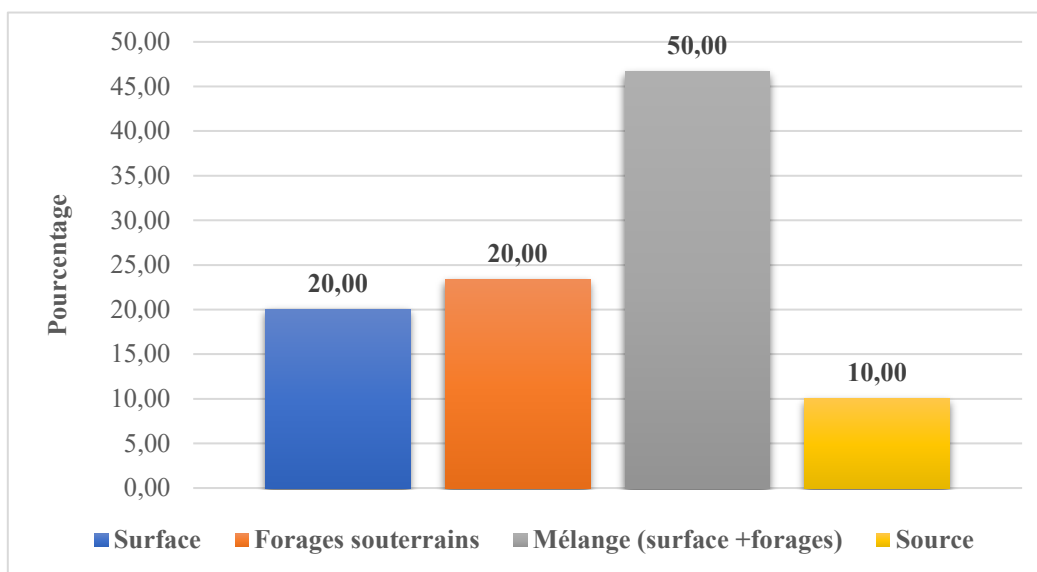


Figure 85. Répartition des eaux du robinet selon leur origine.

Cette figure illustre la répartition des eaux du robinet en fonction de leur origine :

- 50 % des eaux du robinet proviennent d'un mélange d'eaux de surface (barrage Mexa et barrage Bounamoussa) et de forages souterrains (Gurebès-Sanhadja, Guelâat Bousbaâ...etc.).
- 20 % sont issues de forages souterrains.
- 20 % proviennent exclusivement d'eaux de surface.
- 10 % sont issues d'eaux de source (source Bouzizi, source Romaine et source Romanette).

5.2. Résultats du dosage de l'aluminium

Le Tableau 109 présente les concentrations en aluminium mesurées dans les eaux analysées.

Tableau 109. Statistiques descriptives de l'aluminium dans les eaux analysées.

| Type d'eau | N | Minimum (µg/L) | Maximum (µg/L) | Moyenne (µg/L) | Ecart type |
|---------------------------|----|----------------|----------------|----------------|------------|
| Eaux conditionnées | 36 | 0 | 636,250 | 148,298 | 122,318 |
| - Eaux minérales | 12 | 0 | 636,250 | 160,291 | 178,447 |
| - Eaux de source | 24 | 0 | 397,660 | 142,302 | 86,174 |
| Eaux du robinet | 30 | 0 | 275,240 | 98,907 | 57,534 |

L'analyse des concentrations en aluminium selon les différentes catégories d'eau révèle des variations significatives. Les eaux conditionnées, englobant à la fois les eaux minérales et les eaux de source, présentent des teneurs moyennes en aluminium globalement plus élevées que celles concernées dans les eaux du robinet. La concentration maximale a été enregistrée dans une eau minérale (Mozaya), atteignant 636,25 µg/L.

Parmi les eaux conditionnées, les eaux minérales présentent la concentration moyenne la plus élevée (160,291 µg/L), accompagnée d'un écart type important (178,447 µg/L), témoignant d'une forte variabilité entre les échantillons.

Les eaux de source présentent une moyenne légèrement inférieure (142,302 µg/L) avec une dispersion plus modérée (écart type de 86,174 µg/L), traduisant une meilleure homogénéité des résultats.

En comparaison, les eaux du robinet se distinguent par une concentration moyenne plus faible (98,907 µg/L) et une variabilité relativement réduite (écart type de 57,534 µg/L).

5.2.1. Comparaison des taux d'aluminium entre les eaux conditionnées et les eaux du robinet

- **Test de normalité des concentrations en aluminium dans les eaux conditionnées et du robinet**

Le Tableau 110 présente les résultats des tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk).

Tableau 110. Résultats des tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk).

| Type d'eau | Kolmogorov-Smirnov (Sig.) | Shapiro-Wilk (Sig.) |
|------------------|---------------------------|---------------------|
| Eau en bouteille | 0,006 | < 0,001 |
| Eau du robinet | 0,002 | 0,006 |

Les deux tests de normalité appliqués aux groupes d'eaux conditionnées et d'eaux du robinet se sont révélés significatifs ($p < 0,05$), indiquant que la distribution des concentrations en aluminium s'écarte de la normalité dans les deux cas.

En conséquence, l'utilisation du test paramétrique de Student n'est pas appropriée. Un test non paramétrique, dans l'occurrence du test de Mann-Whitney, a donc été retenu pour comparer les deux groupes.

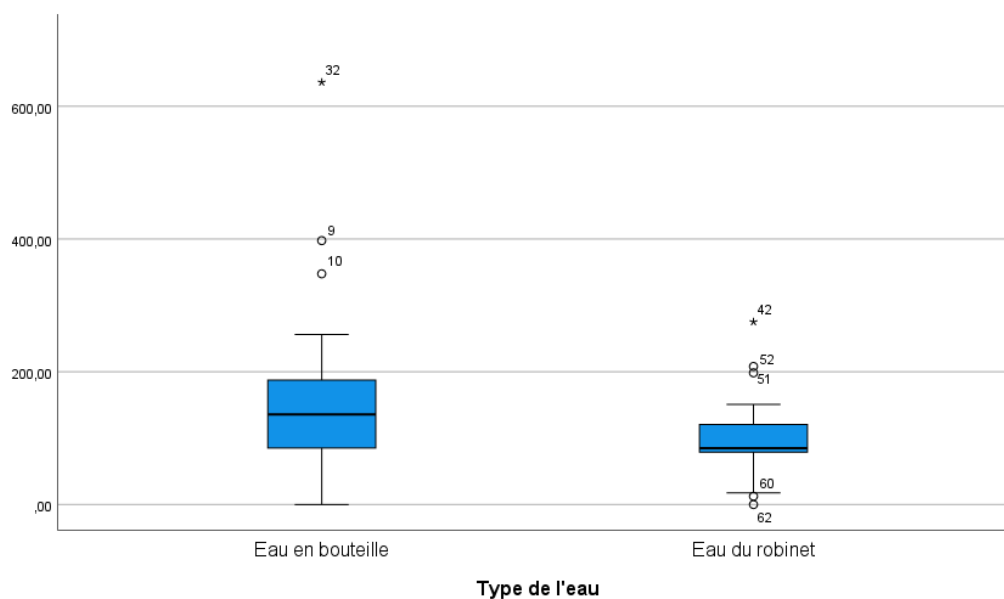


Figure 86. Comparaison des concentrations en aluminium entre l'eau conditionnée et l'eau du robinet.

Le boxplot présenté permet de visualiser la dispersion des concentrations en aluminium selon les différentes catégories d'eau. Il ressort que les eaux conditionnées présentent une médiane plus élevée que celle des eaux du robinet, indiquant une concentration en aluminium généralement plus importante dans ce groupe.

Par ailleurs, les eaux conditionnées se caractérisent par la présence de valeurs extrêmes élevées, atteignant jusqu'à 600 µg/L, traduisant une forte variabilité intra-groupe. A l'inverse, les eaux du robinet présentent une distribution plus homogène, avec une dispersion réduite. La fréquence et l'amplitude des valeurs aberrantes observées dans les eaux conditionnées témoignent d'une hétérogénéité marquée des concentrations en aluminium dans ce type d'eau.

- **Analyse du test de Mann-Whitney**

Le Tableau 111 présente les résultats du test de Mann-Whitney, utilisé pour comparer les concentrations en aluminium entre les eaux conditionnées et les eaux du robinet.

Tableau 111. Résumé des résultats du test de Mann-Whitney.

| Test statistique | Valeur |
|------------------------------------------------|--------------|
| Nombre total d'échantillons | 66 |
| U de Mann-Whitney | 363,5 |
| W de Wilcoxon | 828,5 |
| Statistique Z | -2,273 |
| Erreur standard | 77,643 |
| Signification asymptotique (bilatérale) | 0,023 |

L'hypothèse nulle (H_0) stipule que la distribution des concentrations d'aluminium est la même entre les eaux conditionnées et l'eau du robinet. Les résultats du test de Mann-Whitney ont montré une valeur $p = 0,023$, qui est inférieure au seuil de signification de $0,05$. Ainsi, nous rejetons l'hypothèse nulle et nous pouvons conclure qu'il existe une différence significative entre les concentrations en aluminium des eaux conditionnées et de l'eau du robinet.

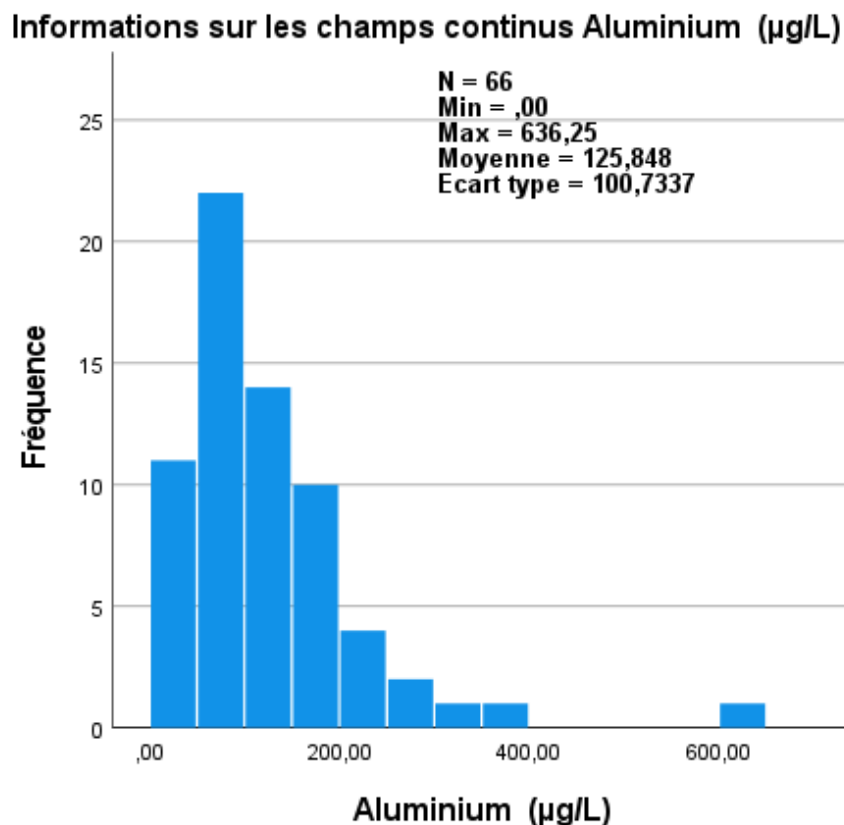


Figure 87. Distribution des concentrations en aluminium dans l'ensemble des échantillons analysés.

L'histogramme ci-dessus illustre la distribution des concentrations en aluminium ($\mu\text{g/L}$) dans l'ensemble des échantillons analysés. La majorité des échantillons présentent des teneurs inférieures à $200 \mu\text{g/L}$, tandis que quelques valeurs dépassant $400 \mu\text{g/L}$ traduisant la présence de concentrations exceptionnellement élevées. La moyenne observée s'élève à $125,85 \mu\text{g/L}$, accompagnée d'un écart type important ($100,73 \mu\text{g/L}$), ce qui reflète une forte dispersion des données autour de la moyenne.

Test U de Mann-Whitney pour échantillons indépendants

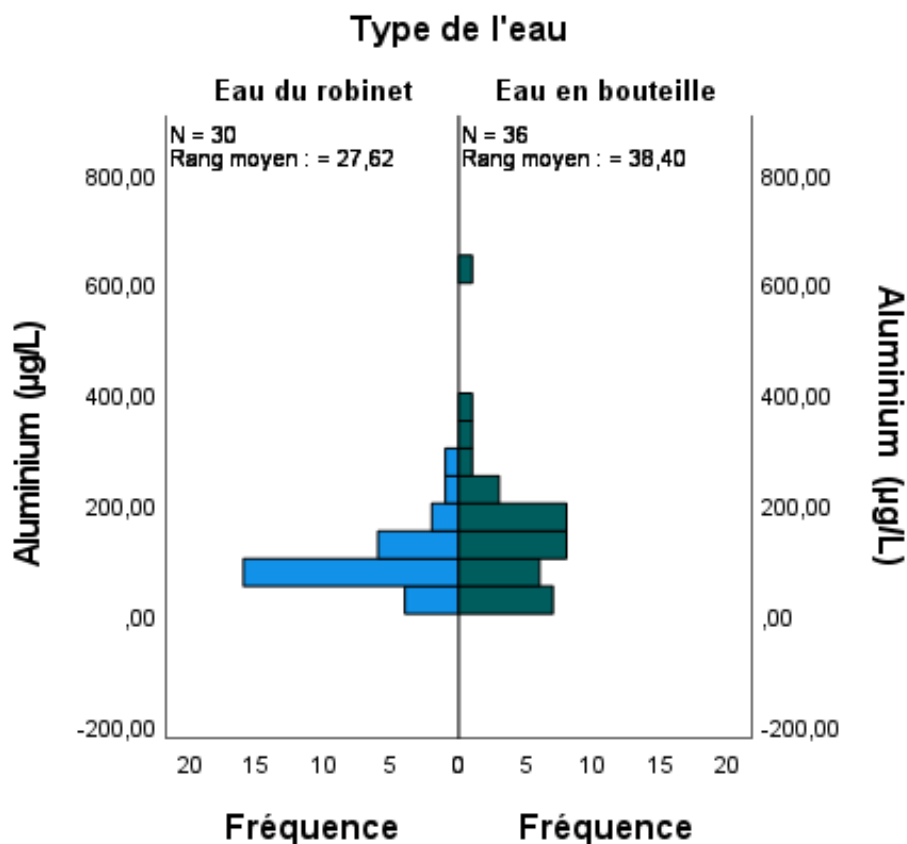


Figure 88. Comparaison des distributions d'aluminium entre l'eau conditionnée en bouteille et l'eau du robinet (Test de Mann-Whitney)

Cette figure présente la fréquence des concentrations en aluminium selon le type d'eau analysé. Les eaux conditionnées présentent des concentrations globalement plus élevées et une dispersion plus marquée que celles appartenant aux eaux du robinet. Cette différence est confirmée par la comparaison des rangs moyens, nettement distincts entre les deux groupes : 38,40 pour les eaux en bouteille contre 27,62 pour les eaux du robinet, indiquant des teneurs en aluminium significativement plus importantes dans les eaux conditionnées.

5.2.2. Comparaison des concentrations en aluminium entre les eaux de source et les eaux minérales

- **Test de normalité des concentrations en aluminium entre les eaux minérales et les eaux de source**

Le Tableau 112 présente les résultats des tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk) appliqués aux concentrations en aluminium dans les eaux minérales et les eaux de source.

Tableau 112. Résultats des tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk).

| Nature de l'eau | Kolmogorov-Smirnov (Sig.) | Shapiro-Wilk (Sig.) |
|-----------------|---------------------------|---------------------|
| Eaux minérales | 0,061 | 0,007 |
| Eaux de source | 0,200 | 0,098 |

Comme les eaux minérales ne suivent pas une distribution normale, nous devons utiliser un test non paramétrique (test de Mann-Whitney).

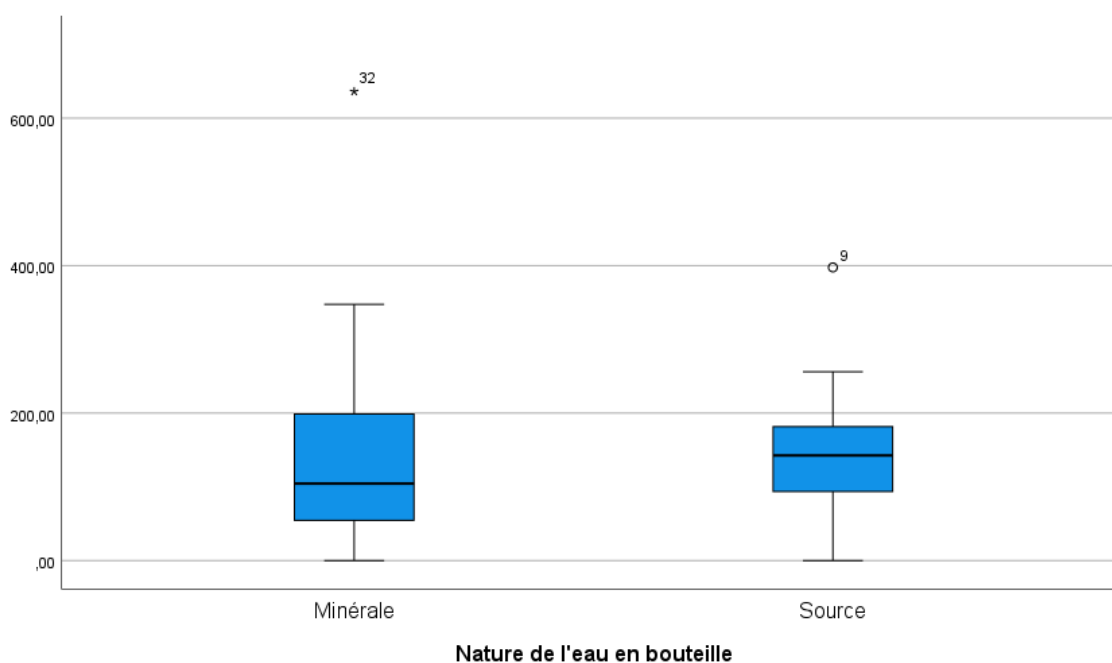


Figure 89. Comparaison des concentrations en aluminium entre les eaux minérales et les eaux de source.

Les médianes des deux groupes sont proches. Les eaux minérales présentent une plus grande dispersion des valeurs, avec des valeurs aberrantes élevées (au-dessus de 600 µg/L). Les eaux de source ont une distribution plus homogène, bien qu'elles contiennent aussi quelques valeurs extrêmes. Visuellement, il n'y a pas une grande différence entre les deux types d'eau (Figure 89).

- Résultats du test de Mann-Whitney

Tableau 113. Résumé des résultats du test U de Mann-Whitney.

| Test statistique | Valeur |
|-----------------------------------------|---------------|
| Nombre total d'échantillons | 036,000 |
| U de Mann-Whitney | 164,000 |
| W de Wilcoxon | 464,000 |
| Statistique Z | 00,671 |
| Erreur standard | 029,79 |
| Signification asymptotique (bilatérale) | 00,502 |
| Signification exacte (bilatérale) | 00,518 |

Les résultats du test de Mann-Whitney montrent une valeur $p = 0,518$, qui est supérieure au seuil de signification de 0,05, ainsi nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle (Tableau 113). Cela signifie qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les concentrations en aluminium des eaux minérales et des eaux de source et ces deux dernières présentent des niveaux d'aluminium similaires, sans différence significative.

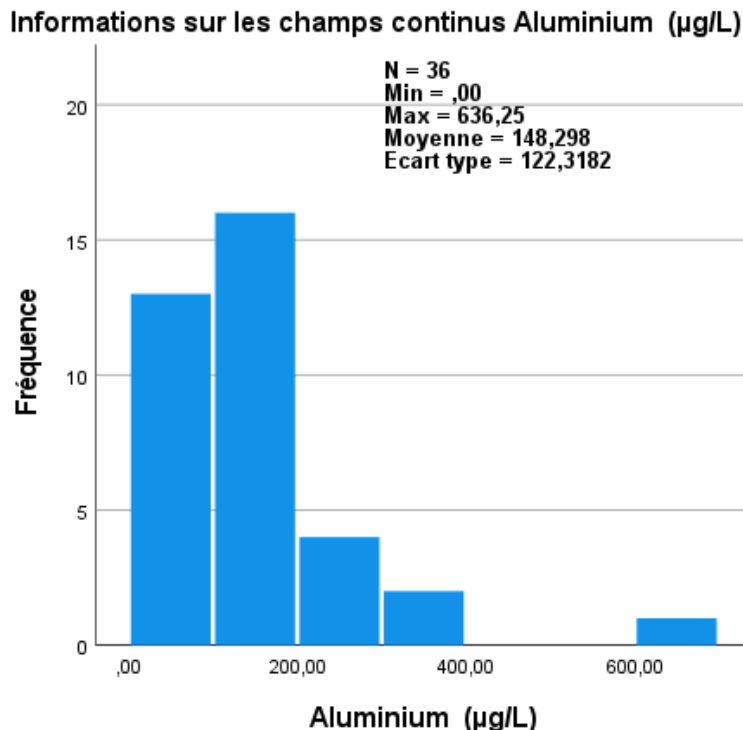


Figure 90. Distribution des concentrations en aluminium dans les eaux minérales et les eaux de source.

Cet histogramme représente la répartition des concentrations en aluminium dans les 36 échantillons analysés.

La majorité des échantillons ont des concentrations comprises entre 0 et 200 $\mu\text{g/L}$.

La moyenne est de 148,3 $\mu\text{g/L}$ avec un écart type élevé (122,3 $\mu\text{g/L}$), ce qui reflète une dispersion importante des concentrations.

Test U de Mann-Whitney pour échantillons indépendants

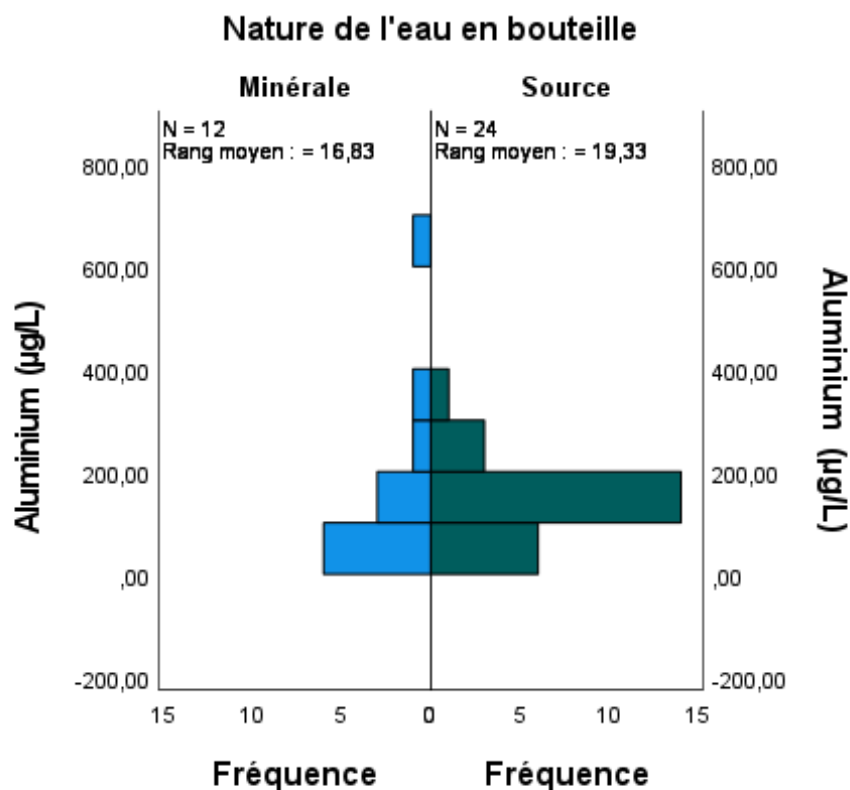


Figure 91. Comparaison des distributions d'aluminium entre les eaux minérales et les eaux de source (Test de Mann-Whitney).

La Figure 91 compare les distributions des concentrations en aluminium entre les eaux minérales et les eaux de source, sur la base du test de Mann-Whitney.

Les rangs moyens sont légèrement différents, mais cette différence n'est pas statistiquement significative :

Le rang moyen des eaux minérales est de l'ordre de 16,83, tandis que celui des eaux de source atteint 19,33 (ils sont très proches).

5.2.3. Analyse descriptive des concentrations en aluminium selon l'origine géographique (bassins hydrographiques)

L'analyse des concentrations en aluminium dans les eaux conditionnées, réparties selon leur bassin hydrographique d'origine, met en évidence des différences notables en termes de niveaux moyens, de dispersion et d'amplitude des valeurs mesurées. Le tableau 114 synthétise les principales statistiques descriptives pour chaque bassin

Tableau 114. Statistiques descriptives des concentrations en aluminium ($\mu\text{g/L}$) selon le bassin hydrographique.

| Bassin hydrographique | Moyenne ($\mu\text{g/L}$) | Médiane ($\mu\text{g/L}$) | Ecart type ($\mu\text{g/L}$) | Min - Max ($\mu\text{g/L}$) | Plage ($\mu\text{g/L}$) |
|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Oranie-Chott Chergui | 165,63 | 190,63 | 58,09 | 99,22 - 207,03 | 107,81 |
| Algérois-Hodna-Soummam | 159,81 | 135,94 | 196,87 | < LQ - 636,25 | 636,25 |
| Constantinois-Seybousse-Mellegue | 113,42 | 110,84 | 64,04 | < LQ - 221,09 | 221,09 |
| Sahara | 187 | 157,82 | 79,86 | 109,84 - 347,66 | 237,82 |

- Les concentrations moyennes les plus élevées ont été enregistrées dans le **bassin du Sahara** (187,00 $\mu\text{g/L}$), suivi par le bassin **Oranie-Chott Chergui** (165,63 $\mu\text{g/L}$).
- Le **bassin Constantinois-Seybousse-Mellegue** présente la concentration moyenne la plus faible (113,42 $\mu\text{g/L}$), avec une distribution relativement homogène.
- Le bassin **Algérois-Hodna-Soummam** se distingue par une très forte variabilité des concentrations, comme en témoigne son écart type élevé (196,87 $\mu\text{g/L}$) et une plage de valeurs atteignant 636,25 $\mu\text{g/L}$, ce qui reflète la présence d'une valeur maximale exceptionnelle.
- Dans les autres bassins, les concentrations maximales sont plus modérées (comprend entre 200 et 350 $\mu\text{g/L}$), avec des écarts moins marqués entre les moyennes et les médianes, traduisant une distribution plus équilibrée.

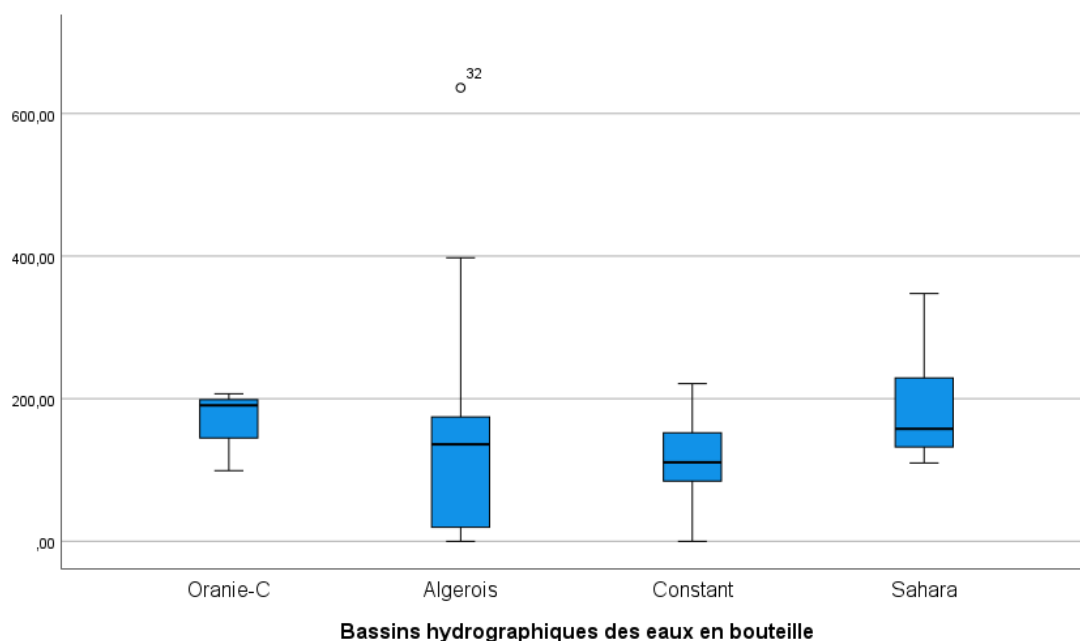


Figure 92. Comparaison des concentrations en aluminium dans les eaux conditionnées selon le bassin hydrographique.

Le boxplot comparatif met en évidence les différences de distribution des concentrations en aluminium entre les différents bassins :

- Le **bassin Algérois-Hodna-Soummam** présente la dispersion la plus importante, avec une valeur aberrante très élevée 600 µg/L, ce qui témoigne d'une forte hétérogénéité.
- Le **bassin du Sahara** affiche des concentrations relativement élevées mais plus homogènes, avec une distribution resserrée autour de la médiane.
- Les **bassins Oranie-Chott Chergui et Constantinois-Seybousse-Mellegue** présentent des distributions plus compactes, traduisant une moindre variabilité des teneurs en aluminium dans ces zones.

5.2.4. Analyse descriptive des concentrations en aluminium dans l'eau du robinet selon l'origine

Nous avons comparé les concentrations d'aluminium en fonction de l'origine de l'eau du robinet.

Tableau 115. Résumé des statistiques descriptives.

| Origine de l'eau du robinet | Moyenne (µg/L) | Médiane (µg/L) | Écart-type (µg/L) | Min - Max (µg/L) | Plage (µg/L) |
|-----------------------------|----------------|----------------|-------------------|------------------|--------------|
| Surface | 128,27 | 103,55 | 60,93 | 76,33 - 208,04 | 131,71 |
| Forages souterrains | 84,64 | 85,82 | 5,76 | 75,42 - 92,47 | 17,05 |
| Surface + forages | 107,60 | 92,87 | 60,48 | 17,54 - 275,24 | 257,70 |
| Sources | 25,24 | 12,45 | 33,52 | 0,00 - 63,28 | 63,28 |

Le Tableau 115 présente les statistiques descriptives des concentrations en aluminium dans l'eau du robinet selon son origine :

- Les **eaux de surface** présentent la concentration moyenne en aluminium la plus élevée (128,27 $\mu\text{g/L}$), suivie par les eaux issues d'un mélange surface + fourrages (107,60 $\mu\text{g/L}$).
- Les **forages souterrains** affichent des teneurs moyennes plus faibles (84,64 $\mu\text{g/L}$).
- Les **sources naturelles**, quant à elles, se distinguent par les concentrations moyennes les plus basses (25,24 $\mu\text{g/L}$), indiquant une contamination nettement moindre en aluminium.

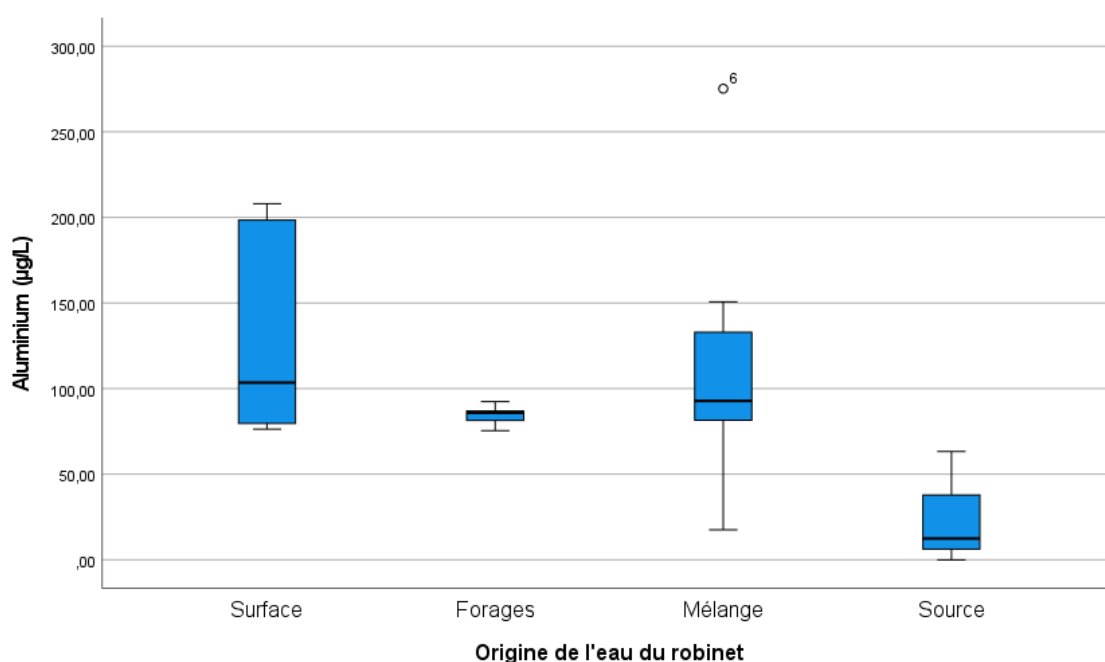


Figure 93. Distribution des concentrations en aluminium dans l'eau du robinet selon l'origine hydrologique.

Le boxplot présenté met en évidence les différences de distribution des concentrations en aluminium selon le type de ressource hydrique :

- Les **eaux de surface** se caractérisent par une forte dispersion des valeurs, avec une médiane plus élevée que celle des autres groupes.
- Les **forages souterrains** présentent une distribution resserrée, indiquant une faible variabilité des concentrations entre les échantillons.
- Le **mélange d'eaux de surface et de fourrages** montre une variabilité importante, marquée par la présence d'une valeur extrême supérieure à 275 $\mu\text{g/L}$.

- Enfin, les **sources naturelles** présentent les concentrations les plus faibles, traduisant une moindre contamination en aluminium.

5.2.5. Comparaison des résultats en aluminium retrouvés avec les normes

La Figure 94 compare la teneur en aluminium des échantillons aux normes réglementaires, en fonction du type d'eau analysé.

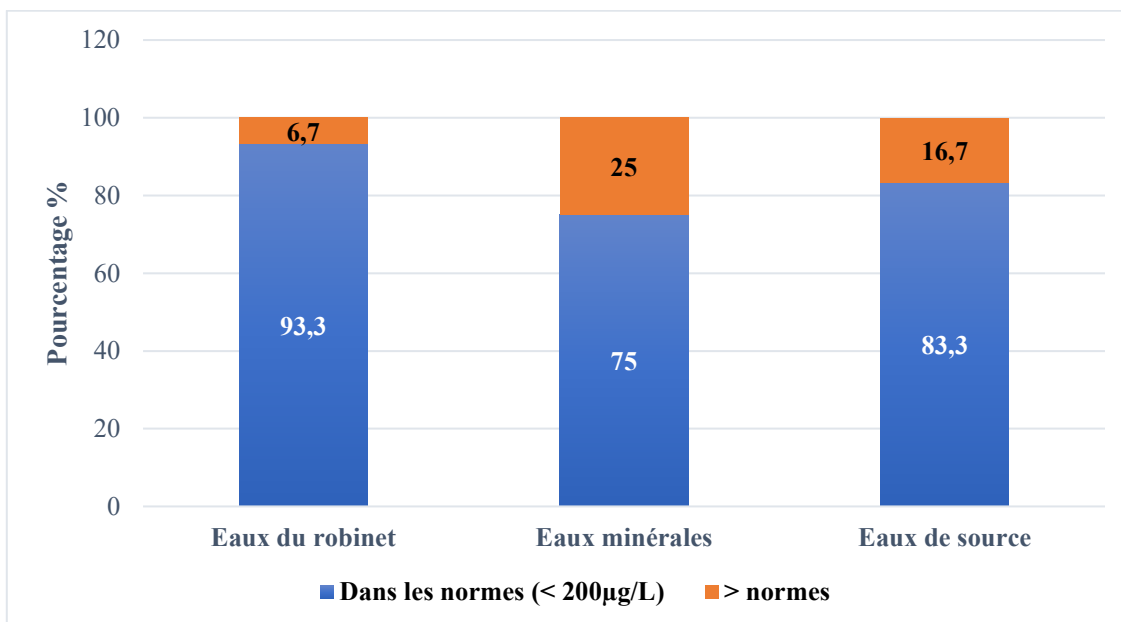


Figure 94. Comparaison de la teneur en aluminium aux normes selon le type d'eau.

L'analyse de la conformité des échantillons par rapport à la norme en aluminium révèle les tendances suivantes :

- Les eaux du robinet présentent un taux de conformité élevé, avec 93,3 % des échantillons respectant les normes réglementaires, contre 6,7 % dépassant les limites fixées.
- Les eaux minérales présentent une conformité plus faible, avec 75,0 % des échantillons conformes et 25,0 % non conforme.
- Les eaux de source se situent dans une position intermédiaire, avec 83,3 % de conformité et 16,7 % d'échantillons dépassant la valeur limite.

5.3. Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) d'aluminium via l'eau

Les résultats relatifs aux doses hebdomadaires ingérées (DHI) d'aluminium via l'eau de reconstitution chez les nourrissons, selon le sexe et la tranche d'âge, sont présentés dans les tableaux correspondants (cf. Annexe 10). Aucune des DHI estimées ne dépasse la dose hebdomadaire tolérable (DHT) fixée à 1 mg/kg de poids corporel par semaine, conformément aux recommandations internationales.

6. Discussion

6.1. Développement analytique

L'optimisation de la méthode spectrophotométrique (Rouge d'Alizarine S) a confirmé une absorbance maximale à 510 nm. Ce résultat est cohérent avec les travaux de *Hernández-Méndez et al. (1983)*, qui ont observé un déplacement bathochromique du complexe en présence de PVP 40, stabilisant ainsi le complexe formé [251]. Cet effet hyperchromique du PVP 40 a été confirmé par *Santos et al. (2015)*, qui l'ont appliqué pour le dosage de l'aluminium dans l'eau d'hémodialyse [113].

Le pH optimal de 4,5, utilisé dans notre étude, est également en accord avec plusieurs travaux de référence [112,113]. Toutefois, d'autres auteurs comme *Zaid Noor Obaid Al-Husseini et al. (2022)* ont rapporté des pH plus neutres [252], probablement en lien avec des tampons différents affectant la stabilité du complexe. Le choix d'un pH légèrement acide dans notre cas a permis de limiter les interférences, notamment avec les traces de métaux.

L'optimisation a été conduite en deux phases : un plan de criblage de type Plackett-Burman, suivi d'un plan central composite.

La phase de criblage a permis d'identifier les deux facteurs les plus influents sur l'absorbance : la concentration en Rouge d'Alizarine S ($p < 0,01$) et le temps de développement de la coloration ($p < 0,05$). A l'inverse, la concentration du PVP 40 et celle du tampon acétate n'ont pas montré d'effet significatif ($p > 0,28$), en accord avec les observations de *Leng et al. (2016)* et de *Santos et al. (2015)* [112,113].

Le plan composite central a affiné les conditions optimales. Le modèle quadratique a mis en évidence une interaction significative entre la concentration en colorant et le temps ($p = 0,027$), ainsi qu'un effet quadratique notable du temps de réaction ($p = 0,010$), suggérant un optimal autour de 10 minutes. Le coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté = 0,683) et la précision adéquate (> 9) confirment la fiabilité du modèle. La solution optimale sélectionnée correspond à une concentration de 400 $\mu\text{mol/L}$ de Rouge d'Alizarine S et un temps de réaction de 10 minutes.

La validation a été menée conformément aux normes ISO/CEI 17025 et NF V03-110 [259-261] et l'approche basée sur le profil d'exactitude [262–264]. La gamme de quantification s'étend de

5 à 400 µg/L, ce qui couvre largement les concentrations retrouvées dans les eaux de consommation.

L'analyse de la fonction de réponse a confirmé la validité du modèle quadratique pour la courbe d'étalonnage, avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,999 enregistrés sur les trois jours d'analyse. Ce modèle offre ainsi une meilleure fidélité et une robustesse accrue par rapport à un ajustement linéaire simple.

Les résultats des normes de validation montrent des taux de recouvrement compris entre 94 % et 114 %, avec des biais relatifs inférieurs à ± 6 %, attestant de la justesse et de la précision de la méthode. Le profil d'exactitude confirme la conformité de la méthode sur l'ensemble de la gamme, avec une erreur totale maîtrisée.

La LOQ obtenue (5 µg/L) est comparable à celle rapportée par *Santos et al. (2015)* [113]. Elle est inférieure à celles rapportées par *Zaid Noor Obaid Al-Husseini et al.* (18 µg/L) et *Leng et al. (15 µg/L)*, indiquant une meilleure sensibilité [112,252].

L'estimation de l'incertitude a permis d'identifier des niveaux de confiance acceptables, notamment dans la gamme intermédiaire (50 à 200 µg/L), où la précision est la plus élevée. Ces résultats sont conformes aux exigences de performance attendues pour les méthodes appliquées à l'analyse des eaux destinées à la consommation humaine.

Les risques d'interférences liés à la présence de fer et de cuivre ont été détectés. Selon *Santos et al. (2015)* et *Hernández-Méndez et al. (1983)*, ces métaux peuvent interférer à des concentrations ≥ 1 mg/L. Toutefois, les limites réglementaires algériennes pour l'eau potable sont inférieures (0,3 mg/L pour le fer, 2 mg/L pour le cuivre), et les dilutions opérées lors des analyses réduisent encore ces risques [113,251]. Si besoin, l'ajout d'acide ascorbique ou de L-Histidine permet de neutraliser ces interférences.

Le contrôle qualité a été assuré par l'insertion systématique de points de calibrage (5, 100 et 400 µg/L), des essais à blanc, ainsi qu'une carte de contrôle basée sur le point à 100 µg/L. Aucun écart significatif n'a été observé, garantissant la stabilité du système analytique sur la durée de l'étude.

6.2. Caractéristiques des échantillons

L'analyse des échantillons d'eau collectés dans la wilaya d'Annaba a permis de caractériser leur diversité selon plusieurs critères : type d'eau, origine hydrologique et répartition géographique. Un total de 66 échantillons a été étudié, dont 36 d'eau en bouteille (54,5 %) et 30 d'eau du robinet (45,5 %).

D'après l'enquête réalisée, 89,7 % des mères utilisent de l'eau en bouteille pour préparer les biberons, contre seulement 8 % qui utilisent l'eau du robinet. Parmi les eaux conditionnées, 66,67 % sont des eaux de source et 33,33 % des eaux minérales. Les premières présentent une variabilité de composition liée à leur origine géologique, tandis que les secondes sont plus homogènes mais potentiellement plus riches en minéraux.

Géographiquement, la majorité des eaux analysées proviennent des bassins Constantinois-Seybousse-Mellegue (38,89 %) et Algérois-Hodna-Soummam (30,56 %), ce qui reflète la proximité géographique de ces sources par rapport à la wilaya d'Annaba. La nature géologique des bassins influence directement la composition chimique des eaux [271].

Les 30 échantillons d'eau du robinet ont été prélevés dans 12 communes. La commune d'Annaba (6 échantillons) et El Bouni (5 échantillons) sont les plus représentées, ce qui reflète leur densité de population.

L'analyse de l'origine des eaux révèle que 50 % proviennent d'un mélange eaux de surface / forages, 20 % de forages seuls, 20 % de surfaces seules, et 10 % de sources naturelles. Les principaux barrages identifiés sont ceux de Chaffia et Mexa. Les forages incluent Guerbès (Aïn El Berda, Chorfa, El Eulma) et Guelaat Bousbaâ (Berrahel, Tréat, Oued El Aneb). Les communes de Chétaïbi et Seraïdi sont partiellement alimentées par des sources naturelles.

Cette diversité d'origines influe sur la composition chimique des eaux, d'où l'importance de la prendre en compte pour l'interprétation des résultats analytiques.

6.3. Résultats du dosage de l'aluminium

L'analyse des 66 échantillons révèle des différences marquées selon les catégories d'eau. Les eaux conditionnées affichent une moyenne plus élevée (148,298 µg/L) que les eaux du robinet (98,907 µg/L). La concentration maximale (636,25 µg/L) a été mesurée dans une eau minérale (Mozaya), contre 275,24 µg/L pour l'eau du robinet.

Les eaux minérales présentent la variabilité la plus importante (écart type : 178,447 µg/L). Le test de Mann-Whitney ($p = 0,023$) confirme une différence significative entre les deux groupes. Ces résultats indiquent que les eaux en bouteille, fréquemment utilisées pour les nourrissons, peuvent constituer une source notable d'exposition à l'aluminium.

Comparativement, une étude à Nouakchott (*Dick et al., 2021*) a révélé des concentrations bien inférieures (30–90 µg/L) [272]. Au Canada, les valeurs peuvent atteindre 2 mg/L, avec une valeur maximale acceptable fixée à 2,9 mg/L [60]. En Europe, les niveaux varient de 120 µg/L (Espagne) à 2 000 µg/L (Allemagne) [61].

Entre eaux de source et eaux minérales, les moyennes sont proches (142,302 µg/L vs 160,291 µg/L). Le test de Mann-Whitney ($p = 0,518$) n'indique pas de différence significative, ce qui s'explique par l'origine hydrologique commune de certaines marques.

L'analyse globale montre une moyenne générale de 125,85 µg/L avec un écart type élevé (100,73 µg/L). Des valeurs extrêmes (> 600 µg/L) observées chez certaines marques (Mozaya, Atlas, Ayris) soulignent la nécessité d'une surveillance accrue. De plus, l'exposition cumulative à l'aluminium via l'eau consommée par les nourrissons doit être prise en compte dans l'évaluation des risques. L'aluminium est un neurotoxique reconnu et son accumulation dans l'organisme est associée à divers troubles neurologiques et métaboliques. Chez les nourrissons, une exposition prolongée à de fortes concentrations d'aluminium peut affecter le développement neurologique [273].

Les concentrations en aluminium varient selon les bassins hydrologiques : Sahara (187,00 µg/L), Oranie-Chott Chergui (165,63 µg/L), Algérois-Hodna-Soummam (159,81 µg/L, avec forte variabilité), et Constantinois (113,42 µg/L).

Pour les eaux du robinet : les eaux de surface sont les plus concentrées (128,27 µg/L), en lien avec l'usage du sulfate d'aluminium ($Al_2(SO_4)_3$) comme coagulant. En effet, l'arrêté du 30 mars 2011 fixant la liste des produits chimiques utilisables pour le traitement et la correction des eaux de consommation humaine confirme que le sulfate d'aluminium est autorisé dans le traitement des eaux de boisson [274].

Les forages souterrains montrent des concentrations plus faibles (84,64 µg/L). Le mélange surface/forages affiche une forte dispersion, avec un pic de 275,24 µg/L. Les sources naturelles ont les niveaux les plus bas (25,24 µg/L).

- **Comparaison des taux d'aluminium avec les normes**

93,3 % des échantillons d'eau du robinet sont conformes à la norme OMS (200 µg/L), contre 83,3 % pour les eaux de source et seulement 75 % pour les eaux minérales.

6.4. Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI)

Les DHI calculées pour l'eau seule restent en dessous de la Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) fixée à 1 mg/kg/semaine. Toutefois, une addition à l'aluminium présent dans les formules infantiles peut entraîner un dépassement de la DHT, notamment dans les cas suivants:

- Nourrissons consommant de grands volumes de lait (jusqu'à 14 biberons/jour),
- Nourrissons de faible poids à la naissance (prématurés de 1500 g).

Dans ces situations, l'exposition cumulée peut dépasser les seuils de sécurité. Le choix d'une eau faiblement minéralisée et pauvre en aluminium est donc essentiel pour la reconstitution des biberons, en particulier chez les nourrissons les plus vulnérables.

(Les exemples entre parenthèses sont issus de l'enquête menée dans le cadre du présent travail.)

7. Conclusion

Une méthode simple, sensible et validée par spectrophotométrie UV-visible a permis de mesurer avec fiabilité l'aluminium dans 66 échantillons d'eau (bouteilles et robinet) prélevés dans la wilaya d'Annaba. Les eaux embouteillées, bien que globalement conformes à la norme OMS de 200 µg/L, affichent des teneurs plus élevées et plus variables que l'eau du robinet, avec quelques pics supérieurs à 500 µg/L.

L'exposition cumulée des nourrissons peut dépasser la dose hebdomadaire tolérable lorsqu'une eau riche en aluminium est utilisée pour reconstituer des formules lactées déjà chargées.

Il est donc fortement recommandé d'utiliser exclusivement, pour la reconstitution des biberons, une eau faiblement minéralisée dont la teneur en aluminium reste idéalement inférieure à 50 µg/L, afin de prévenir tout dépassement de la dose hebdomadaire tolérable chez les nourrissons, surtout les plus vulnérables.

CHAPITRE IV.

**Étude du relargage et analyse
chimométrique de l'aluminium et des
paramètres physico-chimiques de l'eau**

1. Matériel et méthodes

1.1. Matériel

La verrerie employée a été décrite dans le chapitre III. Les réactifs utilisés pour les analyses, classés par catégorie, sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 116. Classification des réactifs utilisés.

| Catégorie | Réactifs | Marque/Fournisseur |
|----------------------------|-------------------------------------------|---------------------|
| Acides minéraux | Acide nitrique 69% | Merck Emsure® |
| | Acide chlorhydrique | Sigma-Aldrich |
| | Acide sulfurique | Sigma-Aldrich |
| Bases | Hydroxyde de sodium | Biochem Chemopharma |
| | Ammoniaque | Sigma-Aldrich |
| Sels inorganiques | Chlorure de potassium | Fluka ChemiKa |
| | Oxalate d'ammonium | Fluka ChemiKa |
| | Nitrate d'argent | Fluka ChemiKa |
| | Chromate de potassium | Fluka ChemiKa |
| | Fluorure de sodium | Reachim |
| | Nitrate de potassium | Fluka ChemiKa |
| Complexants | Titriplex® III (EDTA disodique) | E. Merck, Darmstadt |
| | Ethylènediaminetétraacétate de magnésium | Fluka ChemiKa |
| Indicateurs | NET (Noir Ériochrome T) | Fluka ChemiKa |
| Tampons | Solutions tampons pH 4, 7 et 10 | VWR Prolabo® |
| Composés organiques | Salicylate de sodium | Sigma-Aldrich® |
| | Tartrate double de sodium et de potassium | Sigma-Aldrich® |

- **Matériel complémentaire**

Des casseroles en aluminium brut (non revêtu, diamètre 15 à 18 cm) de trois fabricants (SAFGAM Algérie, KIRAM Ménage Algérie, AKS Cookware Pakistan) ont été utilisées pour l'étude du relargage de l'aluminium. Leur sélection repose sur leur disponibilité locale et leur coût abordable.

Afin d'éviter toute influence liée à l'usure ou à une contamination préalable par des aliments, seules des casseroles neuves ont été utilisées dans cette étude.

1.2. Méthodes

1.2.1. Etude du relargage de l'aluminium

Cette étape visait à quantifier la quantité d'aluminium transférée dans l'eau lors de l'ébullition dans des casseroles en aluminium, conformément aux recommandations relatives à la préparation des biberons [54,275].

- **Préparation des casseroles**

Chaque casserole a été rincée à trois reprises à l'eau désionisée, puis séchée à l'air libre.

- **Procédure d'ébullition**

- 200 à 300 mL d'eau ont été introduits dans chaque cocotte.
- Les cocottes ont été couvertes afin de limiter l'évaporation et la concentration des échantillons.
- L'ébullition a été déclenchée pendant au moins une minute, conformément aux normes d'hygiène infantile.
- L'eau a ensuite été laissée à refroidir à température ambiante [3,130].

- **Transfert et conservation des échantillons**

Les eaux bouillies ont été transférées dans des flacons en polyéthylène, préalablement trempées pendant 24 h dans une solution d'acide nitrique 10 %, rincées à l'eau ultrapure, puis séchées.

- **Analyse**

- Les échantillons ont été traités selon le protocole de la section « Traitement des échantillons d'eau et conservation ».
- Le dosage de l'aluminium a été réalisé à l'aide de la méthode validée précédemment (cf. section « Optimisation et validation de la méthode de dosage »).
- Chaque type de casserole (SAFGAM, KIRAM, AKS Cookware) a été testé de manière indépendante et répétée.

1.2.2. Déterminations physico-chimiques

Cette analyse visait deux objectifs :

- Evaluer la qualité des eaux recueillies en fonction des critères réglementaires associés à la mention « convient pour les nourrissons » ;
- L'impact des paramètres physico-chimiques sur le relargage d'aluminium observé après ébullition.

Le Tableau 117 présente la liste des paramètres physico-chimiques mesurés ainsi que les techniques analytiques utilisées pour leur détermination.

Tableau 117. Paramètres mesurés et techniques analytiques.

| Paramètre | Méthode/Appareillage | Références | Détails complémentaires |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| pH | Potentiométrie (Eutech Ion 510) | [105,256] | Electrode de verre + électrode de référence au calomel saturé KCl |
| Conductivité | Conductimétrie (Hanna Instruments EC 214) | [105] | Calibration avec KCl 0,01 M (1412 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C) |
| Minéralisation | Calcul à partir de la conductivité | [105] | Application de formules spécifiques selon la gamme de conductivité + correction de température |
| Ca²⁺ + Mg²⁺ | Complexométrie (EDTA + NET comme indicateur) | [105,276] | En présence de complexonate de magnésium |
| Cl⁻ | Titrage par nitrate d'argent (indicateur chromate de potassium) | [277] | Détection du point final par virage rouge |
| Alcalinité (TA/TAC) | Titrage acide-base (HCl N/50) | [105] | TA : phénolphthaléine TAC : hélianthine |
| F⁻ | Potentiométrie (électrode spécifique ISE) | [278] | pH ajusté à 5-7 pour éviter les interférences |
| NO₃⁻ | Méthode au salicylate de sodium (colorimétrie à 415 nm) | [279] | Calcul : $[\text{NO}_3^-] = [\text{N}$ nitrique] $\times 4,43$ |

1.2.3. Approche chimiométrique

Cette approche a été adoptée pour explorer les interactions entre l'aluminium et les variables physico-chimiques de l'eau, avant et après ébullition.

L'analyse a porté sur un total de 66 échantillons, répartis comme suit :

- **Eaux conditionnées** : minérales (M) et de source (S) ;
- **Eaux du robinet** : provenant de barrages (B), de fourrages (F), de mélanges B+F (BF) et de sources (S).

Les variables analytiques prises dans l'étude de chimiométrie sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 118. Liste des variables physico-chimiques pour l'évaluation du comportement de l'aluminium.

| Paramètre | Symbole | Unité |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|
| pH | pH | - |
| Calcium | Ca | mg/L |
| Magnésium | Mg | mg/L |
| Chlorures | Cl | mg/L |
| Bicarbonates | HCO ₃ ⁻ | mg/L |
| Nitrates | NO ₃ ⁻ | mg/L |
| Fluorures | F ⁻ | mg/L |
| Aluminium initial | Al | µg/L |
| Aluminium après chauffage | Al ₁ - Al ₂ - Al ₃ | µg/L |
| Minéralisation | Résidu | mg/L |

1.2.4. Analyses statistiques préliminaires

- **Test de normalité**

Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour évaluer la normalité des distributions. Les résultats indiquent que la majorité des variables ne suivent pas une loi normale ($p < 0,05$), justifiant ainsi l'utilisation de méthodes statistiques non paramétriques dans les étapes ultérieures.

- **Corrélations entre variables**

Etant donné l'absence de normalité pour plusieurs paramètres, le coefficient de corrélation de Kendall (Tau-b) a été préféré. Ce dernier permet de :

- Détecter les liaisons significatives entre l'aluminium et les autres paramètres ;
- Identifier les associations les plus pertinentes pour l'interprétation des résultats ;
- Réduire les redondances avant les analyses multivariées.

- **Régression linéaire multiple**

Des modèles de régression linéaire multiple ont été développés pour prédire les concentrations d'aluminium en fonction des variables physico-chimiques. Cette approche vise à cerner les déterminants les plus influents sur le relargage.

1.2.4.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP a été utilisé afin de réduire la dimension des données et d'identifier les axes de variation majeurs au sein du jeu de données [280,281]. Cette technique est adaptée aux environnements complexes incluant de nombreuses variables interdépendantes [282,283].

- **Étapes de validation de l'ACP :**

- **Indice KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) :** mesure la proportion de variance commune. Une valeur supérieure à 0,5 valide l'analyse.
- **Test de Bartlett :** vérifier que les variables sont significativement corrélées entre elles ($p < 0,05$).

- **Extraction des composantes :**

Les composantes ont été retenues sur la base du critère de Kaiser (valeurs propres > 1). Chaque axe correspond à un pourcentage de variance cumulée, permettant d'identifier les variables structurantes.

- **Inertie et signification des axes**

Le pourcentage de variance expliqué par chaque axe indique la pertinence des composantes retenues. Les premiers axes (CP1, CP2, ...) sont ensuite analysés pour interpréter l'influence des différents paramètres, dont l'aluminium.

- **Projection des échantillons et analyse des groupes**

Les échantillons sont projetés dans le plan factoriel pour observer visuellement les regroupements. Les échantillons qui se ressemblent (en termes de propriétés physico-chimiques) se trouvent proches, ce qui peut aider à déceler la présence de sous-populations ou de types d'eaux similaires.

- **Analyse de Classification Hiérarchique (ACH)**

Pour compléter l'ACP, l'Analyse de Classification Hiérarchique (ACH) a été effectuée, permettant de regrouper les échantillons en classes homogènes, selon leurs caractéristiques physico-chimiques et leur teneur en aluminium. Le dendrogramme issu de cette classification

offre une vision synthétique de la similarité entre les échantillons, et met en évidence les facteurs dominants qui sous-tendent leur regroupement (pH, alcalinité, etc.).

1.3. Critères d'évaluation

Les tableaux suivants (119 à 121) présentent les normes algériennes de qualité utilisées dans cette étude pour l'évaluation des concentrations des éléments minéraux dans les différentes catégories d'eau analysées. Ils incluent également les valeurs maximales autorisées pour les minéraux dans le cadre de l'alimentation infantile, conformément aux critères qui régissent l'attribution de la mention « convient pour les nourrissons ».

Tableau 119. Normes Algériennes de qualité des eaux de distribution [269].

| Caractéristiques | Unité | Valeurs limites |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| pH | Unité pH | 6,5 à 8,5 |
| Conductivité (à 20°C) | μS/cm | 2 800 |
| Alcalinité | mg/L (CaCO ₃) | Minimum 65 |
| Dureté | mg/L (CaCO ₃) | 100 à 500 |
| Chlorures | mg/L (Cl ⁻) | 500 |
| Calcium | mg/L (Ca ²⁺) | 200 |
| Magnésium | mg/L (Mg ²⁺) | 50 |
| Dureté (TH) | mg/L (CaCO ₃) | 500 |
| Nitrates | mg/L (NO ₃ ⁻) | 50 |
| Fluorures | mg/L (F ⁻) | 1,5 |

Tableau 120. Normes Algériennes de qualité des eaux de source [270,284]

| Caractéristiques | Unité | Valeurs limites |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| pH | Unité pH | 6,5 à 8,5 |
| Conductivité (à 20°C) | μS/cm | 2 800 |
| Dureté | mg/L (CaCO ₃) | 100 à 500 |
| Chlorures | mg/L (Cl ⁻) | 500 |
| Calcium | mg/L (Ca ²⁺) | 200 |
| Magnésium | mg/L (Mg ²⁺) | 150 |
| Nitrates | mg/L (NO ₃ ⁻) | 50 |
| Fluorures | mg/L (F ⁻) | 2 |

Tableau 121. Normes Algériennes de qualité des eaux minérales naturelles [270,284].

| Caractéristiques | Unité | Valeurs limites |
|------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Nitrates | mg/L (NO ₃ ⁻) | 50 |
| Fluorures | mg/L (F ⁻) | 5 |

- **Remarques réglementaires :**

Conformément à l'arrêté interministériel du 23 février 2008, modifiant l'arrêté interministériel du 22 janvier 2006, fixant les proportions d'éléments contenus dans les eaux minérales naturelles et les eaux de source ainsi que les conditions de leur traitement ou les adjonctions autorisées [269] :

Article 10 : Si le produit contient plus de 1,5 mg/L de fluorure, il doit porter la mention suivante : « *Ce produit contient plus de 1,5 mg/L de fluor. Il ne convient pas à l'alimentation des bébés et des jeunes enfants pour une consommation régulière.* »

- **Seuils réglementaires pour les eaux adaptées aux nourrissons**

Le Tableau 122 présente les valeurs maximales autorisées pour les principaux minéraux figurant sur l'étiquetage des eaux portant la mention « convient pour les nourrissons ».

Tableau 122. Valeurs maximales autorisées pour les teneurs en minéraux présents sur l'étiquetage des eaux ayant la mention « convient pour les nourrissons » [285].

| Paramètre | Valeurs limites |
|--------------------|--------------------------------------------|
| Calcium | < 100 mg/L |
| Chlorures | < 250 mg/L |
| Fluor | < 0,3 mg/L (avec supplémentation médicale) |
| | < 0,5 mg/L (sans supplémentation médicale) |
| Magnésium | < 50 mg/L |
| Nitrates | < 10 mg/L |
| Résidu sec à 180°C | < 1000 mg/L |

1.4. Traitement statistique et logiciels utilisés

Les données ont été saisies sous Excel 2021 et analysées à l'aide de plusieurs outils :

- **SPSS version 27** : statistiques descriptives, tests de normalité (Shapiro-Wilk), ANOVA, test t, Kruskal-Wallis, régressions multiples.
- **Python** : génération de cartes thermiques (matrices de corrélation).
- **R-4.4.2** et **JMP 11** : ACP et ACH (Analyse de Classification Hiérarchique), avec représentation graphique (par exemple, tracés de constellation).

Le seuil de signification a été fixé à $p < 0,05$ avec un intervalle de confiance de 95 %.

2. Résultats

2.1. Etude du relargage de l'aluminium

2.1.1. Eau du robinet

L'analyse comparative des concentrations d'aluminium avant et après ébullition a permis de mettre en évidence l'ampleur du relargage dans trois types de casseroles.

- Casserole 1 : marque étatique algérienne.
- Casserole 2 : marque privée algérienne.
- Casserole 3 : marque importée du Pakistan.

Le tableau suivant présente la comparaison des concentrations obtenues.

Tableau 123. Comparaison des concentrations d'aluminium avant et après ébullition (eau du robinet).

| Paramètre | N | Minimum (µg/L) | Maximum (µg/L) | Moyenne (µg/L) | Ecart-type (µg/L) |
|--------------------------|----|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| Aluminium initial | 30 | 0,000 | 275,240 | 98,907 | 57,534 |
| Al Casserole 1 | 30 | 35,160 | 1832,470 | 1061,762 | 685,547 |
| Al Casserole 2 | 30 | 71,280 | 1952,400 | 1207,050 | 675,188 |
| Al Casserole 3 | 30 | 48,690 | 1867,240 | 1066,536 | 673,171 |

Avant ébullition, les concentrations en aluminium étaient relativement faibles, avec une moyenne de 98,91 µg/L.

Après 1 minute d'ébullition, il y a eu une augmentation considérable de l'aluminium dans l'eau pour les trois types de casseroles :

- La Casserole 2 a présenté la concentration moyenne la plus élevée d'aluminium relargué (1207,05 µg/L).
- La Casserole 1 et la Casserole 3 ont montré des valeurs similaires (environ 1061-1066 µg/L).

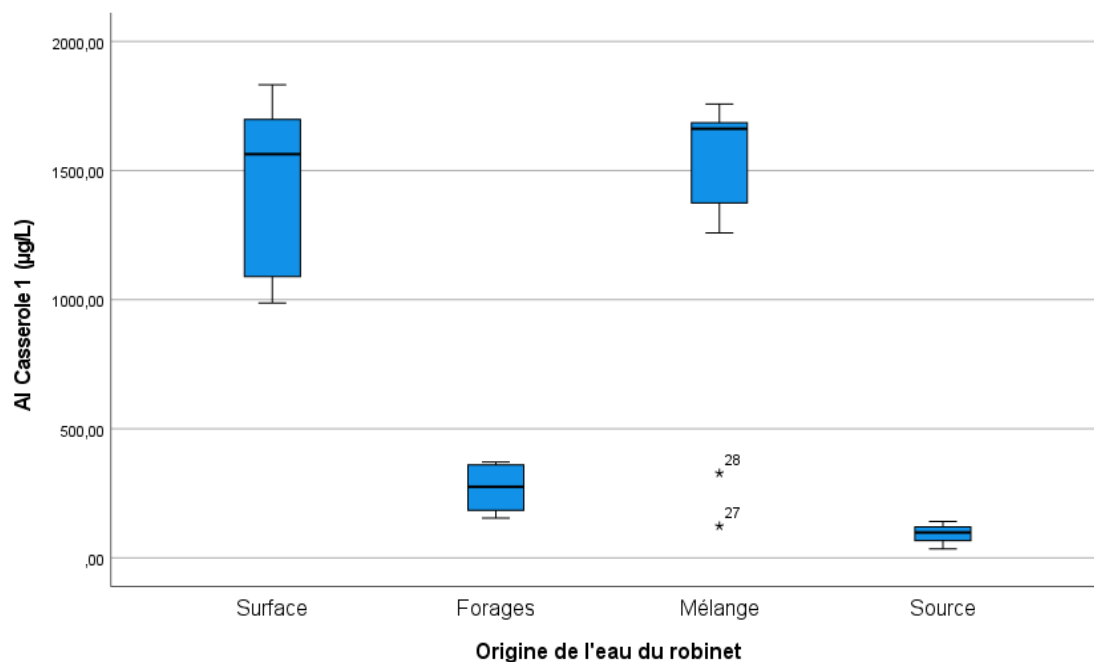


Figure 95. Aluminium relargué par la Casserole 1 en fonction de l'origine de l'eau du robinet.

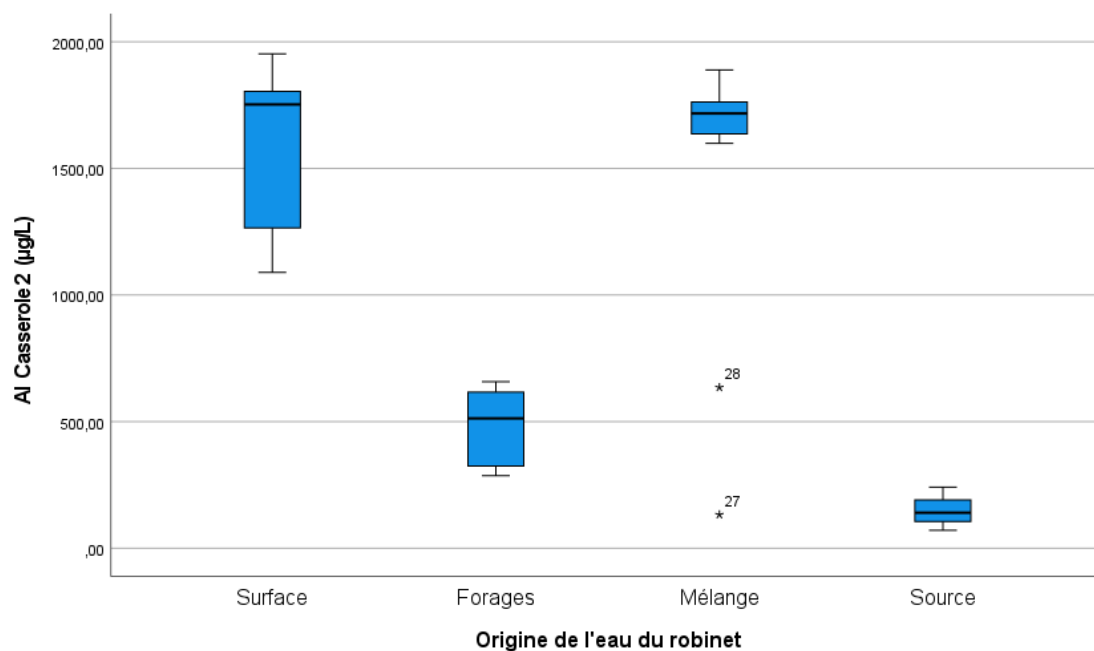


Figure 96. Aluminium relargué par la Casserole 2 en fonction de l'origine de l'eau du robinet.

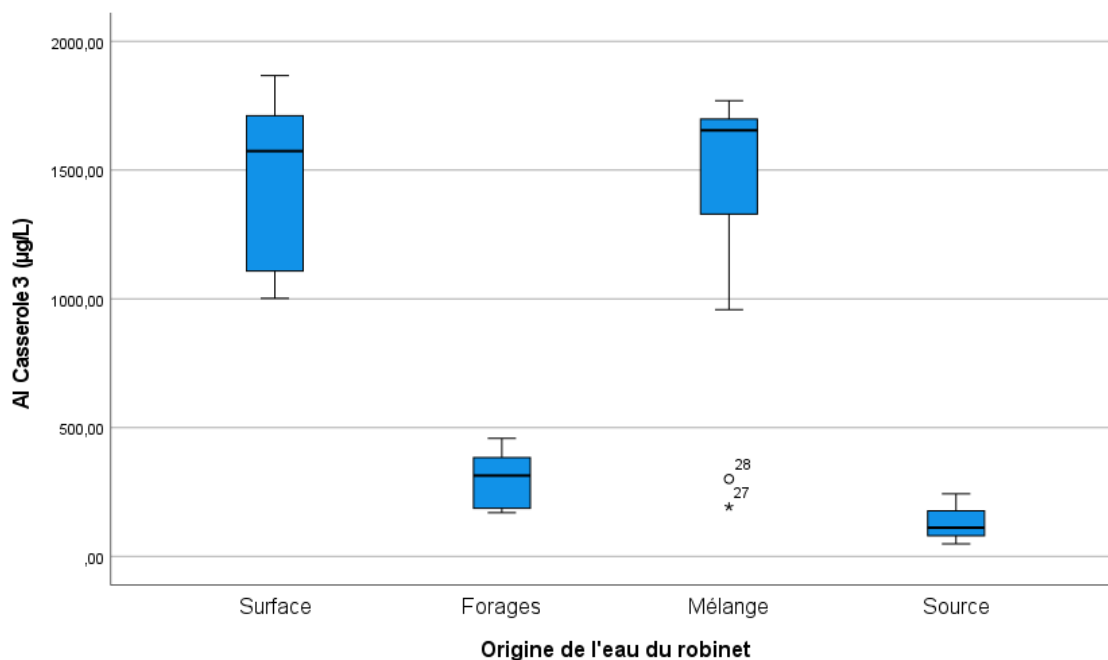


Figure 97. Aluminium relargué par la Casserole 3 en fonction de l'origine de l'eau du robinet.

Ces trois diagrammes à moustaches montrent la concentration en aluminium après ébullition dans trois types de casseroles :

- Les eaux de surface et les mélanges d'eaux représentent les concentrations en aluminium les plus élevées après ébullition, ces dernières dépassent généralement 1500 µg/L dans toutes les casseroles. Ce résultat indique que ces types d'eaux favorisent un relargage important de l'aluminium lors de l'ébullition.
- Les eaux de forage montrent des concentrations plus modérées, généralement comprises entre 300 et 500 µg/L, avec un relargage d'aluminium plus limité comparé aux eaux de surface.
- Les eaux de source présentent les concentrations les plus faibles, essentiellement inférieures à 200 µg/L après ébullition, ce qui témoigne d'un relargage minime de l'aluminium après ébullition.

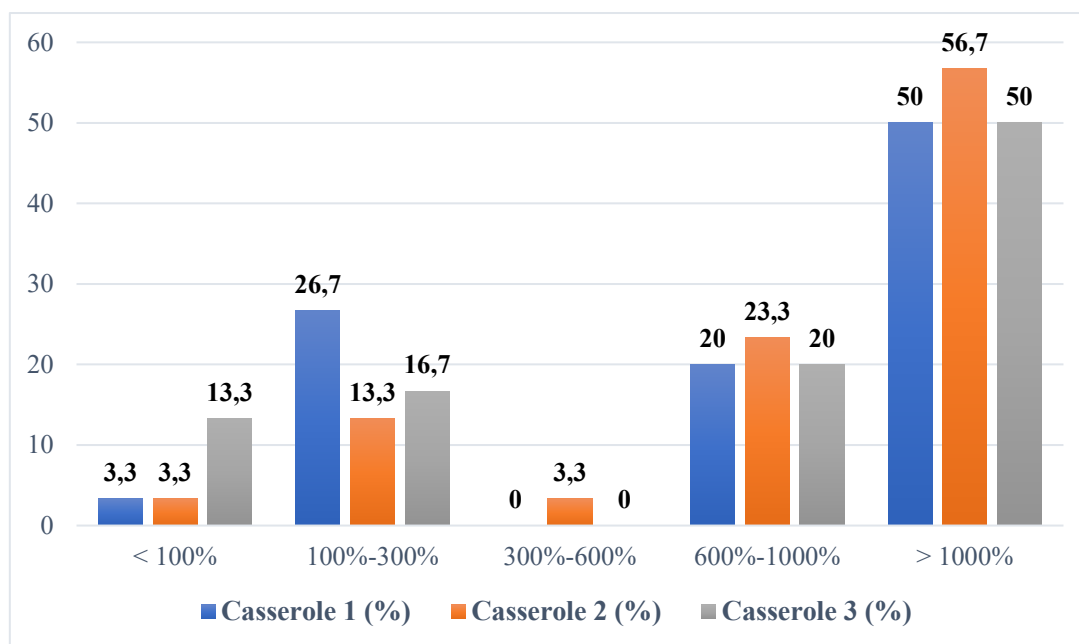


Figure 98. Pourcentage d'augmentation de la teneur en aluminium après ébullition dans les trois casseroles.

Selon cette figure, une majorité des échantillons ont subi une augmentation supérieure à 1000% après ébullition, avec des taux de 50% pour la casserole 1 et la casserole 3. Pour la casserole 2, ce pourcentage atteint 56,7 %.

La casserole 2 présente la plus forte augmentation globale, avec 56,7% des échantillons ayant une hausse > 1000% et 23,3% entre 600% et 1000%. Très peu d'échantillons conservent une teneur en aluminium stable après ébullition : seulement 3,3% à 13,3% des échantillons ont une augmentation inférieure à 100%.

2.1.2. Eau minérale

Les résultats pour les eaux minérales confirment également une augmentation importante de l'aluminium après ébullition. Le tableau 124 compare les concentrations moyennes mesurées avant et après ébullition selon trois types de casseroles utilisées.

Tableau 124. Comparaison des concentrations moyennes d'aluminium avant et après ébullition dans trois types de casseroles.

| Paramètre | N | Minimum (µg/L) | Maximum (µg/L) | Moyenne (µg/L) | Ecart-type (µg/L) |
|--------------------------|----|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| Aluminium initial | 12 | < LOQ | 636,25 | 160,29 | 178,45 |
| Al Casserole 1 | 12 | 21,09 | 1765,20 | 392,46 | 457,18 |
| Al Casserole 2 | 12 | 87,54 | 2867,05 | 581,73 | 737,34 |
| Al Casserole 3 | 12 | 42,72 | 1777,68 | 406,88 | 457,94 |

L'analyse du relargage d'aluminium dans les eaux minérales après ébullition montre une augmentation significative de la concentration en aluminium par rapport aux valeurs initiales :

Avant ébullition, la concentration en aluminium est relativement faible (moyenne de 160,29 $\mu\text{g/L}$). Après ébullition :

- **Casserole 1** : La concentration en aluminium après ébullition atteint une moyenne de 392,46 $\mu\text{g/L}$, avec un maximum de 1765,20 $\mu\text{g/L}$, donc une libération importante d'aluminium.

- **Casserole 2** : Cette casserole présente le plus fort relargage d'aluminium, avec une moyenne de 581,73 $\mu\text{g/L}$ et un maximum de 2867,05 $\mu\text{g/L}$.

- **Casserole 3** : Le relargage ici est légèrement inférieure à la casserole 2, elle relargue également de grandes quantités d'aluminium (moyenne de 406,88 $\mu\text{g/L}$, maximum de 1777,68 $\mu\text{g/L}$).

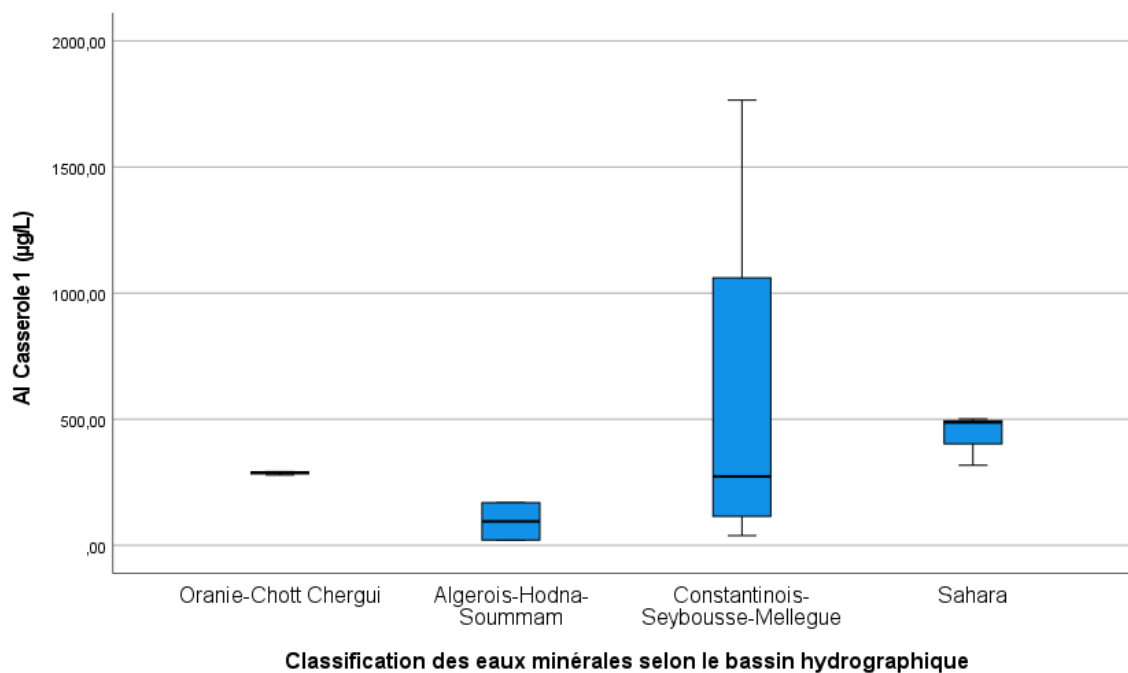


Figure 99. Aluminium relargué par la Casserole 1 en fonction de l'origine de l'eau minérale.

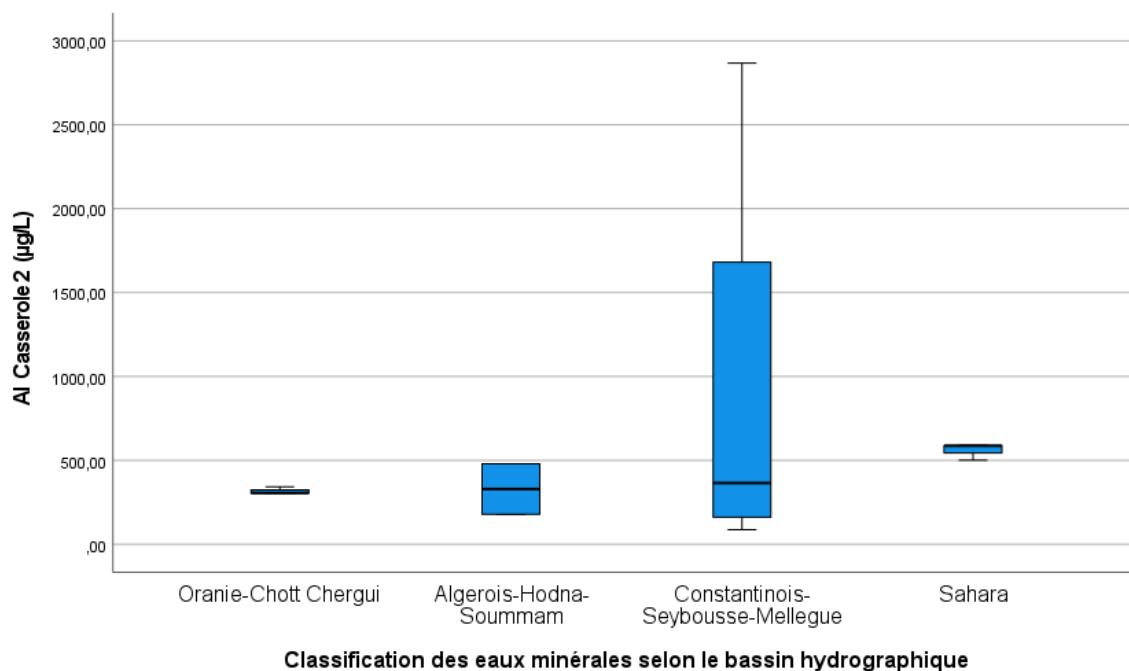


Figure 100. Aluminium relargué par la Casserole 2 en fonction de l'origine de l'eau minérale.

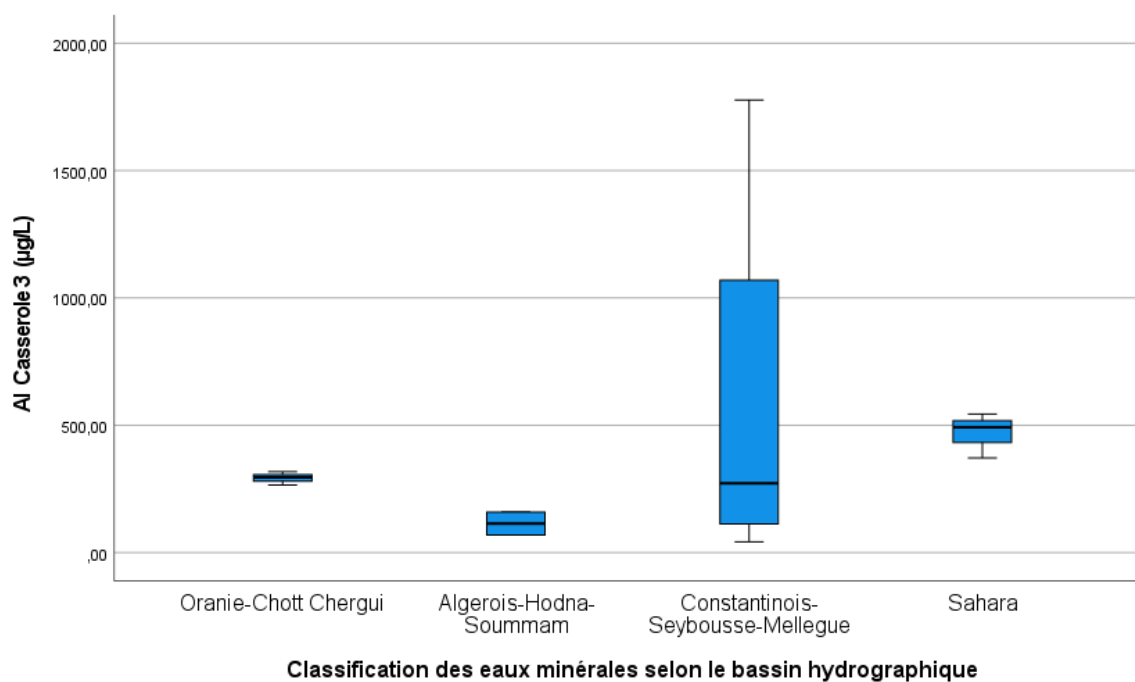


Figure 101. Aluminium relargué par la Casserole 3 en fonction de l'origine de l'eau minérale.

Les trois boxplots représentent la concentration en aluminium libérée après ébullition dans trois les types de casseroles différentes selon l'origine de l'eau utilisée :

- **Oranie-Chott Chergui** : Les valeurs sont relativement homogènes avec une faible dispersion.
- **Algérois-Hodna-Soummam** : Présente une dispersion plus large des valeurs avec une médiane inférieure à celle du bassin précédent. Les valeurs varient considérablement, ce qui témoigne d'une hétérogénéité dans la minéralisation des eaux de ce bassin.
- **Constantinois-Seybousse-Mellègue** : Les valeurs sont légèrement plus élevées que celles du bassin Algérois-Hodna-Soummam avec des valeurs extrêmes élevées.
- **Sahara** : Les valeurs sont nettement plus élevées que dans les autres bassins, mais restent homogènes. Ces eaux ont libéré plus d'aluminium après ébullition.

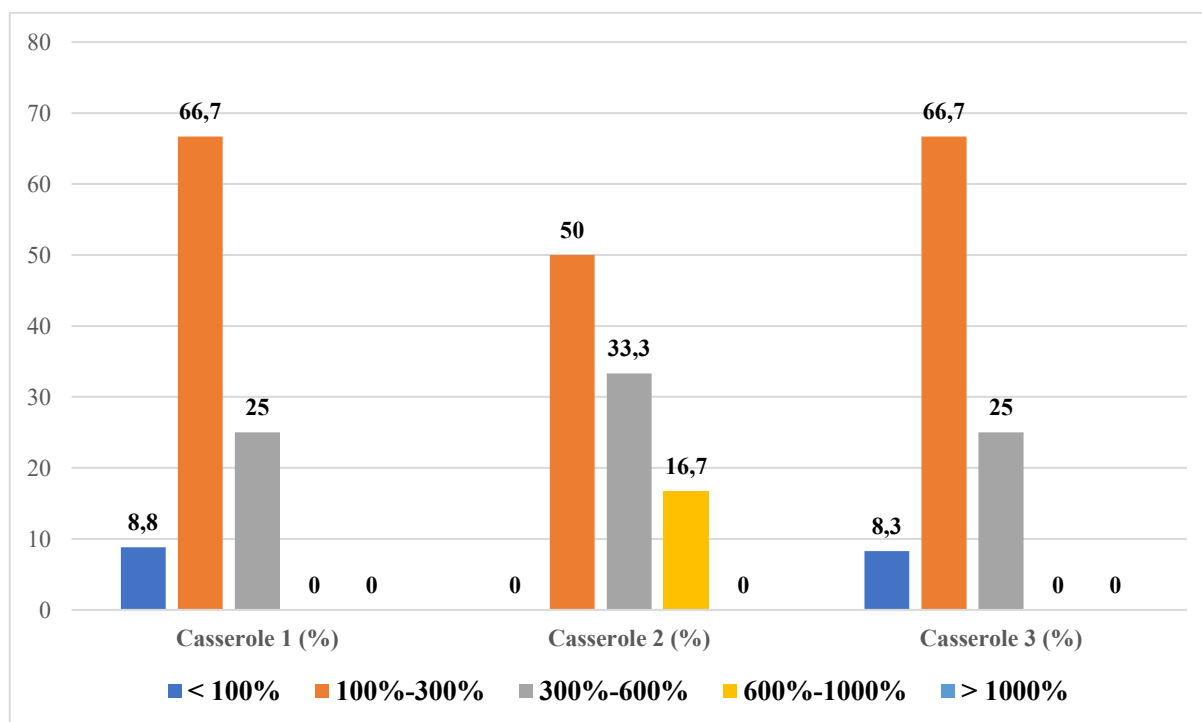


Figure 102. Pourcentage d'augmentation de la teneur en aluminium après ébullition de l'eau minérale dans les trois casseroles.

La Figure 1012 illustre le pourcentage d'augmentation de la teneur en aluminium après ébullition dans trois types de casseroles (étatique, privée, importée). On observe :

- Pour les trois casseroles, la majorité des échantillons indiquent une augmentation comprise entre 100% et 300%.
- Présence d'un nombre très faible d'échantillons avec une augmentation extrême (> 1000%) particulièrement pour la casserole 2 (privée), qui présente la plus grande variabilité.
- La casserole 2 et la casserole 3 montrent des augmentations plus élevées comparativement à la casserole 1.

2.1.3. Eau de source

Les eaux de source présentent un comportement intermédiaire. Le tableau suivant compare les concentrations moyennes d'aluminium mesurées avant et après ébullition.

Tableau 125. Comparaison des concentrations moyennes d'aluminium avant et après ébullition.

| Paramètre | N | Minimum (µg/L) | Maximum (µg/L) | Moyenne (µg/L) | Ecart-type (µg/L) |
|-------------------|----|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| Aluminium initial | 24 | <LOQ | 397,660 | 142,302 | 86,174 |
| Al Casserole 1 | 24 | 14,060 | 489,840 | 267,935 | 132,845 |
| Al Casserole 2 | 24 | 69,530 | 662,500 | 389,474 | 175,262 |
| Al Casserole 3 | 24 | 33,590 | 489,840 | 277,118 | 137,386 |

Les résultats indiquent à nouveau un relargage important, avec la cocotte 2 en tête, suivi par les casseroles 3 et 1. Les concentrations post-ébullition restent néanmoins plus faibles que celles observées avec l'eau du robinet.

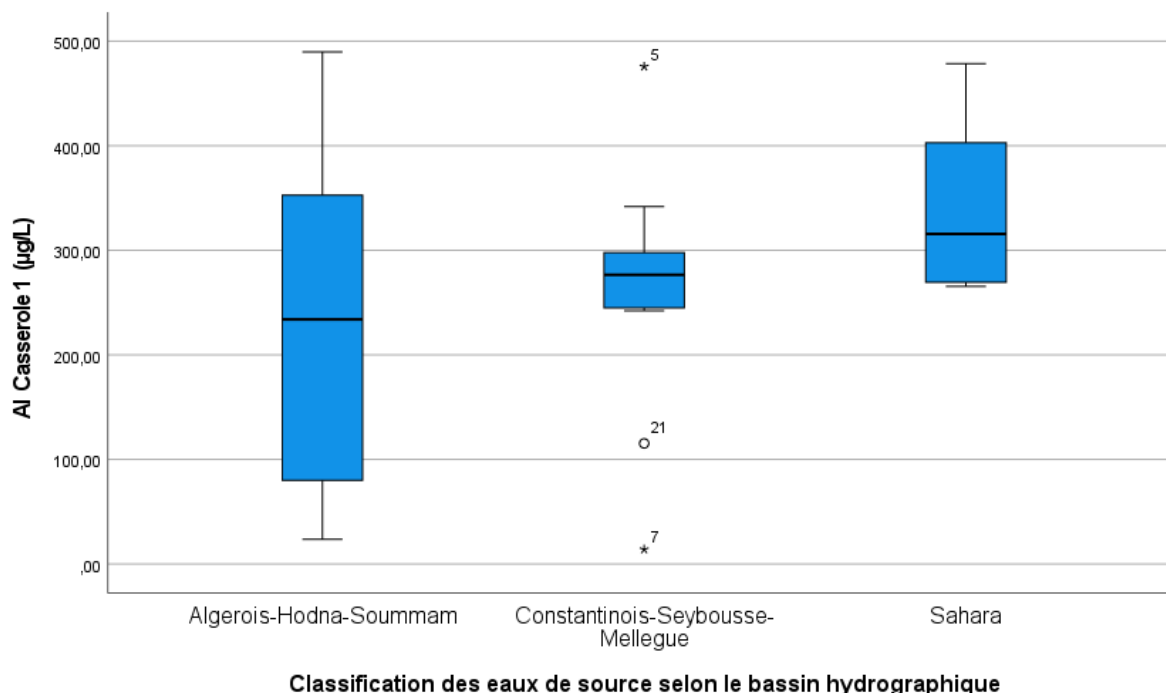


Figure 103. Aluminium relargué par la Casserole 1 en fonction de l'origine de l'eau de source.

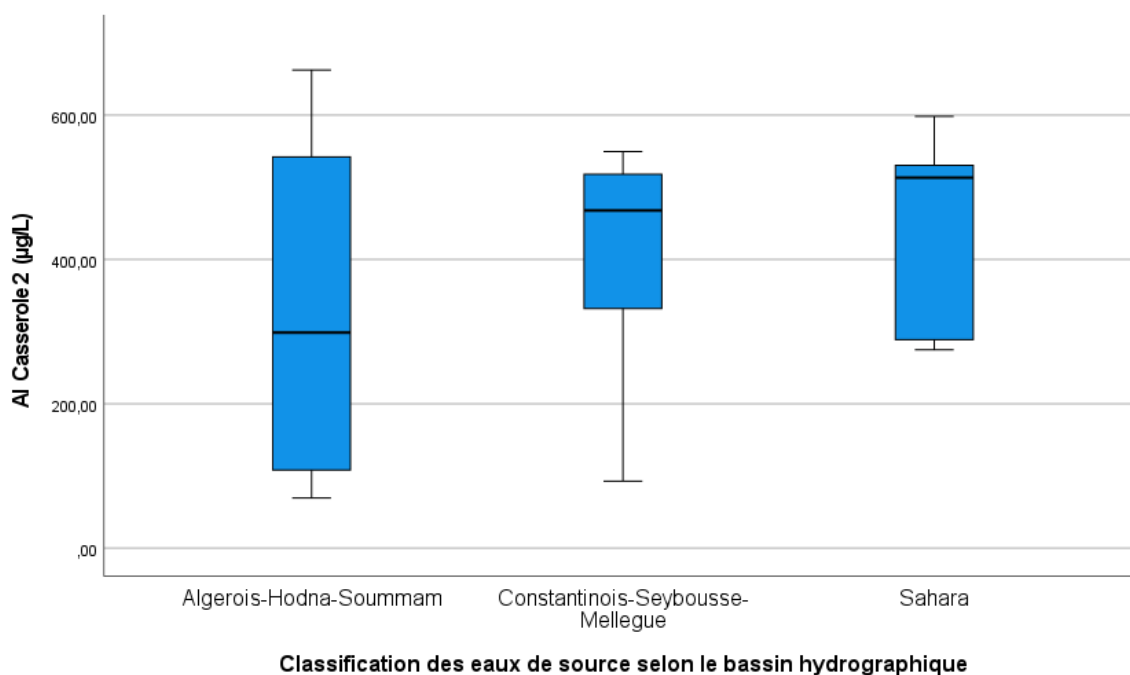


Figure 104. Aluminium relargué par la Casserole 2 en fonction de l'origine de l'eau de source.

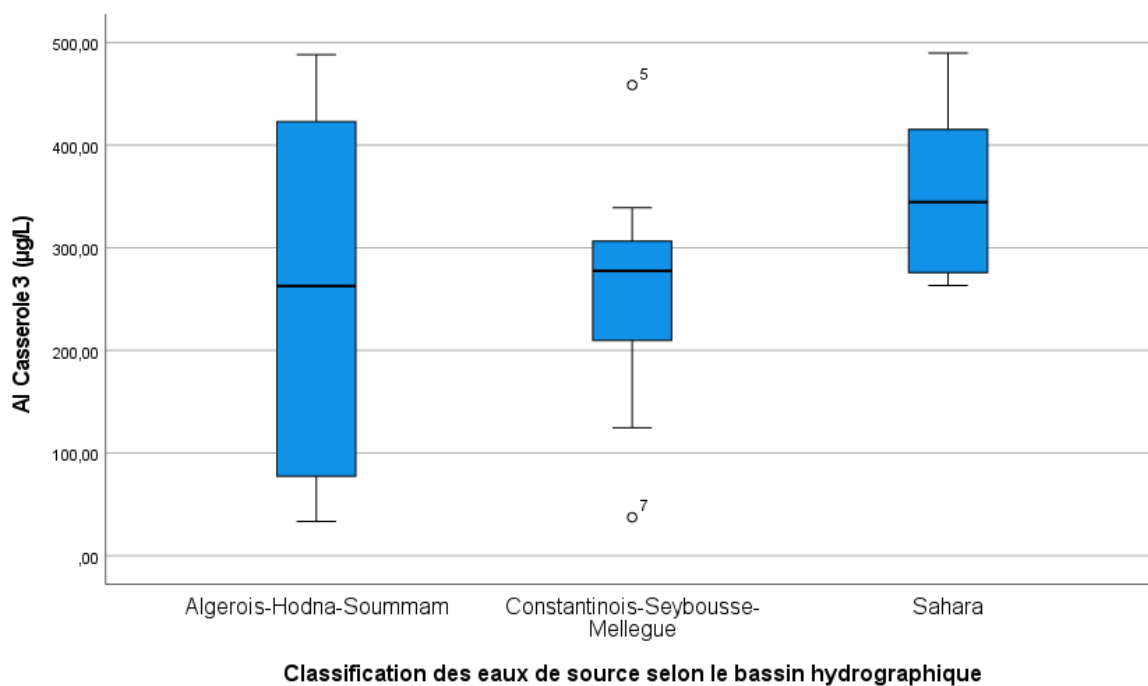


Figure 105. Aluminium relargué par la Casserole 3 en fonction de l'origine de l'eau de source.

Les trois boxplots montrent la distribution des concentrations d'aluminium relargué après ébullition dans les trois casseroles :

- Les eaux du bassin Algérois-Hodna-Soummam présentent une dispersion plus importante des concentrations d'aluminium après ébullition, par rapport aux autres bassins particulièrement dans la casserole 1 et la casserole 3.
- Le bassin Constantinois-Seybousse-Mellegue indique une dispersion plus modérée des concentrations d'aluminium, avec quelques valeurs extrêmes notées.
- Le bassin Sahara présente des concentrations d'aluminium plus élevées en moyenne après ébullition, surtout dans la casserole 2.
- La casserole 2 relargue systématiquement des quantités plus élevées d'aluminium.
- La casserole 1 et la casserole 3 se ressemblent dans le processus du relargage et montrent un comportement similaire.

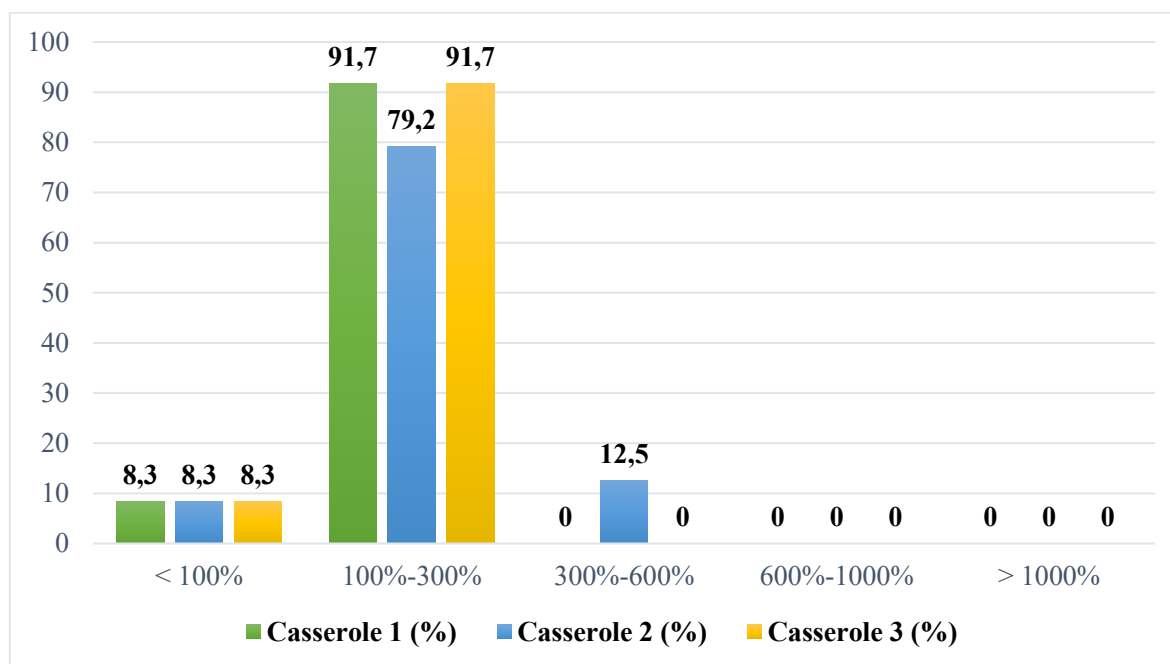


Figure 106. Pourcentage d'augmentation de l'aluminium relargué (Eaux de source)

Cette figure présente la répartition des pourcentages d'augmentation de l'aluminium après ébullition pour les trois types de casseroles utilisées avec les eaux de source. Les principales observations consistent à :

- La plupart des échantillons (91,7%) pour la casserole 1 et la casserole 3 montrent une augmentation de 100 % à 300 % par rapport à la concentration initiale.

- Pour la casserole 2, 79,2 % des échantillons sont dans cette même catégorie, mais elle présente une augmentation plus élevée pour certains échantillons.
- 12,5 % des échantillons avec la casserole 2 montrent une augmentation comprise entre 300 % et 600 %, ce qui indique un relargage plus important de certaines eaux.
- Aucune des casseroles n'a présenté un dépassement de 600 %, ni présente une augmentation supérieure à 1000 % par rapport à la concentration initiale.
- Dans certains cas (8,3%), le relargage d'aluminium est faible (< 100%).

2.1.4. Comparaison du relargage de l'aluminium dans les trois casseroles entre l'eau conditionnée et celle du robinet

Afin d'évaluer l'influence conjointe du type d'eau et du matériau de la casserole sur la migration de l'aluminium, une comparaison du relargage après ébullition a été réalisée entre l'eau conditionnée et l'eau du robinet. Le tableau suivant présente les concentrations mesurées selon le type d'eau et la casserole utilisée.

Tableau 126. Relargage de l'aluminium après ébullition selon le type d'eau et la casserole utilisée.

| Type d'eau | Aluminium initial (µg/L) | Aluminium après ébullition – Casserole 1 (µg/L) | Casserole 2 (µg/L) | Casserole 3 (µg/L) |
|------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Eau du robinet | 98,91 | 1061,76 | 1207,05 | 1066,53 |
| Eau conditionnée | 148,30 | 309,44 | 453,55 | 320,37 |

Les résultats montrent que l'eau du robinet induit un relargage nettement plus élevé, en particulier avec la casserole 2.

L'état de surface des casseroles après ébullition, notamment l'usure visible de la casserole 2, pourrait contribuer à cette différence.

- **Test de normalité**

Avant de procéder aux analyses comparatives, la normalité des distributions a été vérifiée à l'aide des tests de Kolmogorov-Smirnov et de Shapiro-Wilk. Le tableau 127 présente les résultats obtenus.

Tableau 127. Tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk)

| Type de l'eau | Kolmogorov-Smirnov | ddl | Sig. | Shapiro-Wilk | ddl | Sig. |
|------------------------------|--------------------|-----|--------|--------------|-----|--------|
| Al Casserole 1 (µg/L) | | | | | | |
| Eau en bouteille | 0,222 | 36 | <0,001 | 0,604 | 36 | <0,001 |
| Eau du robinet | 0,233 | 30 | <0,001 | 0,801 | 30 | <0,001 |
| Al Casserole 2 (µg/L) | | | | | | |
| Eau en bouteille | 0,317 | 36 | <0,001 | 0,496 | 36 | <0,001 |
| Eau du robinet | 0,286 | 30 | <0,001 | 0,809 | 30 | <0,001 |
| Al Casserole 3 (µg/L) | | | | | | |
| Eau en bouteille | 0,218 | 36 | <0,001 | 0,622 | 36 | <0,001 |
| Eau du robinet | 0,233 | 30 | <0,001 | 0,822 | 30 | <0,001 |

Les résultats montrent que les distributions des concentrations en aluminium après ébullition ne suivent pas une distribution normale ($p < 0,001$ pour tous les tests). Cela implique que des tests non paramétriques seront plus appropriés pour comparer les groupes.

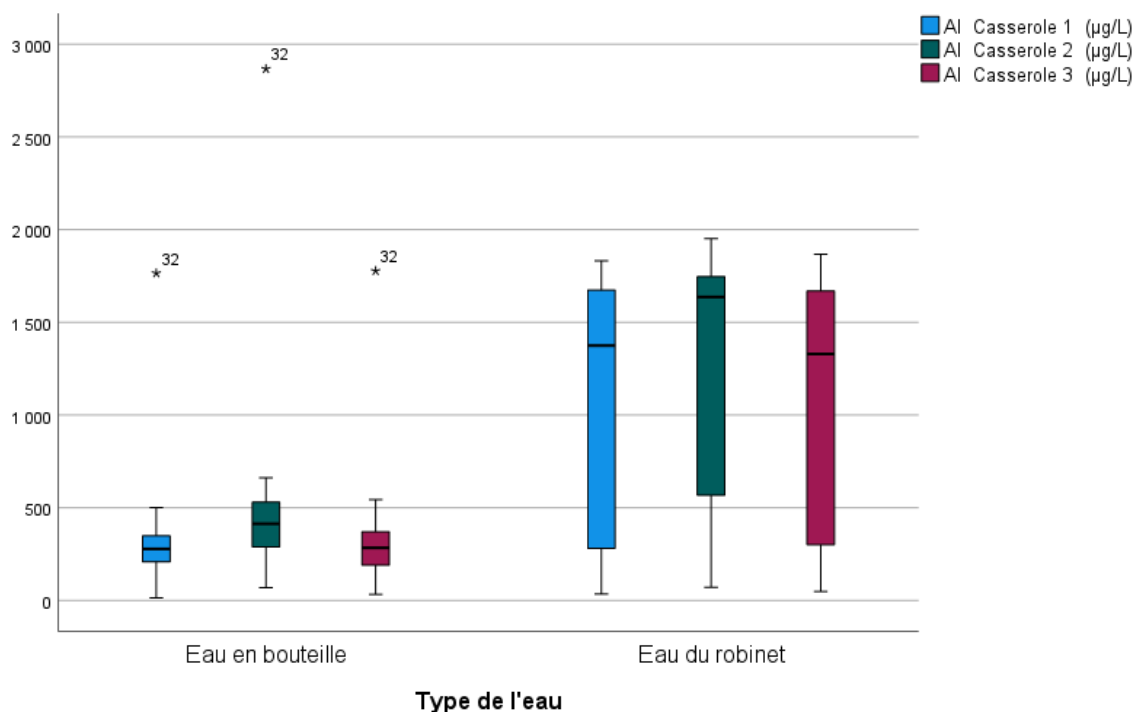


Figure 107. Distribution des concentrations en aluminium selon le type d'eau.

La Figure 107 illustre la distribution des concentrations en aluminium en fonction du type d'eau analysé. On observe que :

- Le relargage d'aluminium est significativement plus élevé pour l'eau du robinet que pour l'eau en bouteille, quel que soit le type de casserole.
- L'eau du robinet présente une plus grande dispersion.

- **Analyse des résultats du test U de Mann-Whitney (casserole 1)**

Le test U de Mann-Whitney a été utilisé pour comparer la distribution du relargage d'aluminium dans la casserole 1 en fonction du type d'eau utilisé. Le tableau suivant présente les résultats de cette analyse statistique.

Tableau 128. Tableau récapitulatif du test U de Mann-Whitney pour la Casserole 1.

| Paramètre | Valeur |
|----------------------------------------------------|---------|
| N total | 66 |
| U de Mann-Whitney | 819 |
| W de Wilcoxon | 1284 |
| Statistiques de test | 819 |
| Erreur standard | 77,652 |
| Statistiques de test standardisées | 3,593 |
| Signification asymptotique (test bilatéral) | < 0,001 |

La valeur de signification est inférieure à 0,001, ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle. Cela signifie qu'il existe une différence significative entre le relargage d'aluminium dans l'eau en bouteille et l'eau du robinet.

Test U de Mann-Whitney pour échantillons indépendants

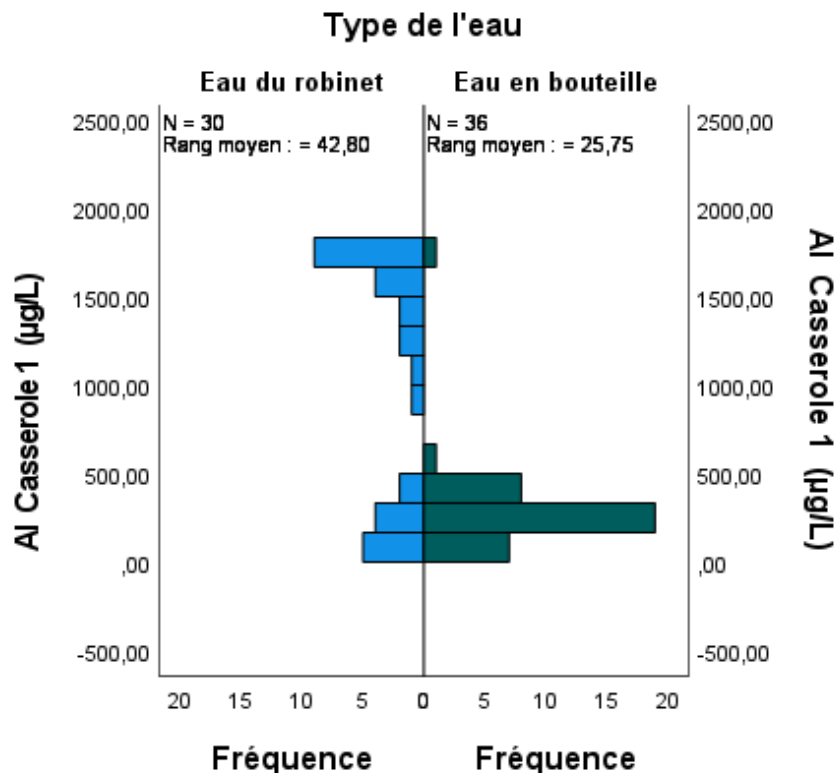


Figure 108. Test de Mann-Whitney – Comparaison eau en bouteille et eau du robinet

Cette figure montre la distribution des valeurs d'aluminium relargué dans la Casserole 1 en fonction du type d'eau utilisé (eau du robinet vs eau en bouteille).

- La médiane et la dispersion sont plus élevées pour l'eau du robinet, indiquant une libération plus importante d'aluminium après ébullition.
- Le rang moyen est plus élevé pour l'eau du robinet (42,80) contre (25,75) pour l'eau en bouteille, ce qui nous mène à suggérer que l'eau du robinet favorise une dissolution plus importante de l'aluminium.

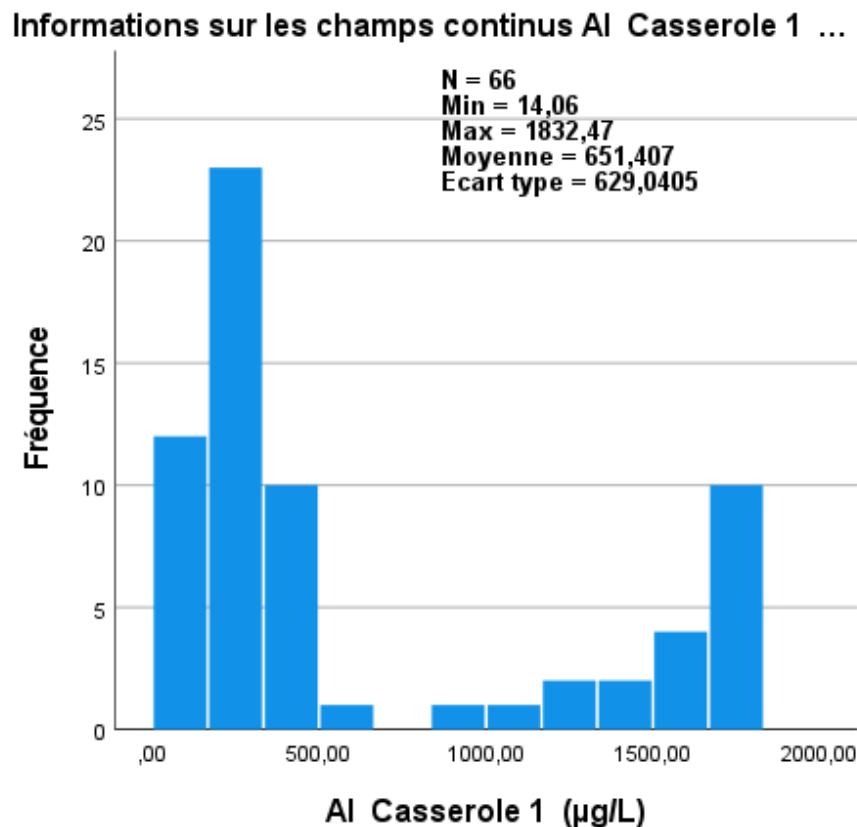


Figure 109. Histogramme des concentrations d'aluminium – Casserole 1.

Cet histogramme illustre la fréquence des valeurs d'aluminium relargué dans la Casserole 1.

- La distribution est asymétrique, avec plusieurs valeurs élevées ($> 1000 \mu\text{g/L}$), donc une hétérogénéité dans le relargage d'aluminium.
 - Un pic de fréquences est observé dans la plage inférieure à $500 \mu\text{g/L}$, mais certaines valeurs dépassent largement $1000 \mu\text{g/L}$, ce qui montre la présence d'échantillons fortement chargés en aluminium.
 - L'écart-type élevé ($629,04 \mu\text{g/L}$) confirme une forte variabilité dans le relargage d'aluminium.
- **Analyse des résultats du test U de Mann-Whitney (casserole 2)**

Une analyse similaire a été réalisée pour la casserole 2 afin de comparer le relargage d'aluminium selon le type d'eau utilisé. Le tableau suivant présente les résultats du test U de Mann-Whitney appliqué à cette comparaison.

Tableau 129. Tableau récapitulatif du test de Mann-Whitney pour la Casserole 2.

| Paramètre | Casserole 2 |
|-----------------------------------------|-------------|
| N total | 66 |
| U de Mann-Whitney | 857 |
| W de Wilcoxon | 1322 |
| Statistiques de test | 857 |
| Erreur standard | 77,651 |
| Statistiques de test standardisées | 4,082 |
| Signification asymptotique (bilatérale) | < 0,001 |

La différence est significative entre l'eau en bouteille et l'eau du robinet pour la Casserole 2 ($p < 0,001$), ce qui indique que le type d'eau influence le relargage d'aluminium.

Test U de Mann-Whitney pour échantillons indépendants

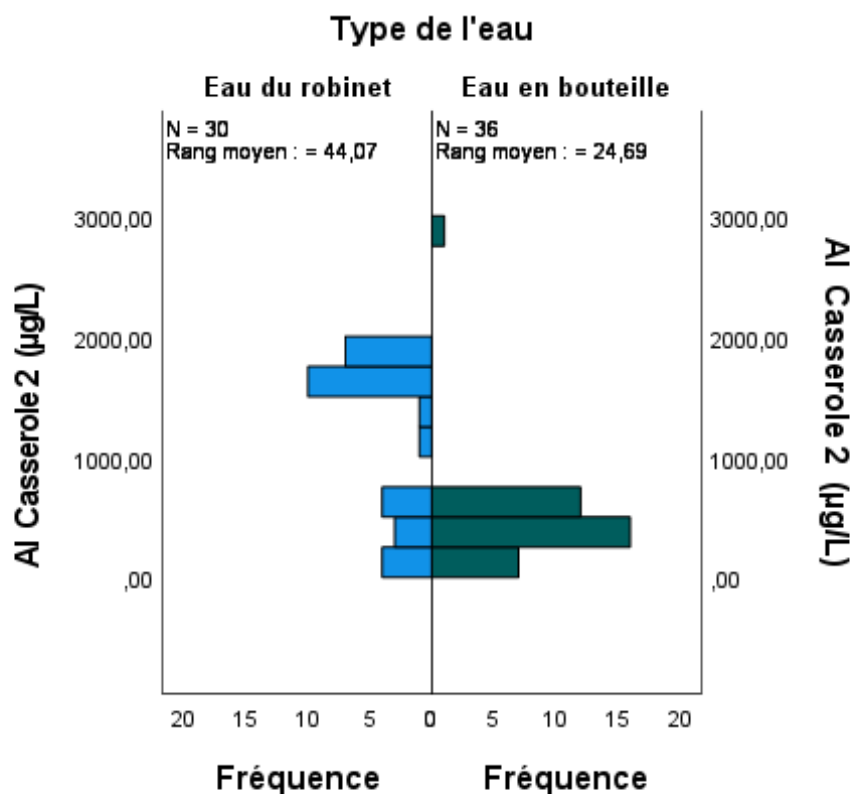


Figure 110. Comparaison du relargage d'aluminium dans la casserole 2 entre l'eau du robinet et l'eau en bouteille.

L'eau du robinet présente un rang moyen plus élevé que l'eau en bouteille (44,07 contre 24,69), donc un relargage plus important (Figure 110).

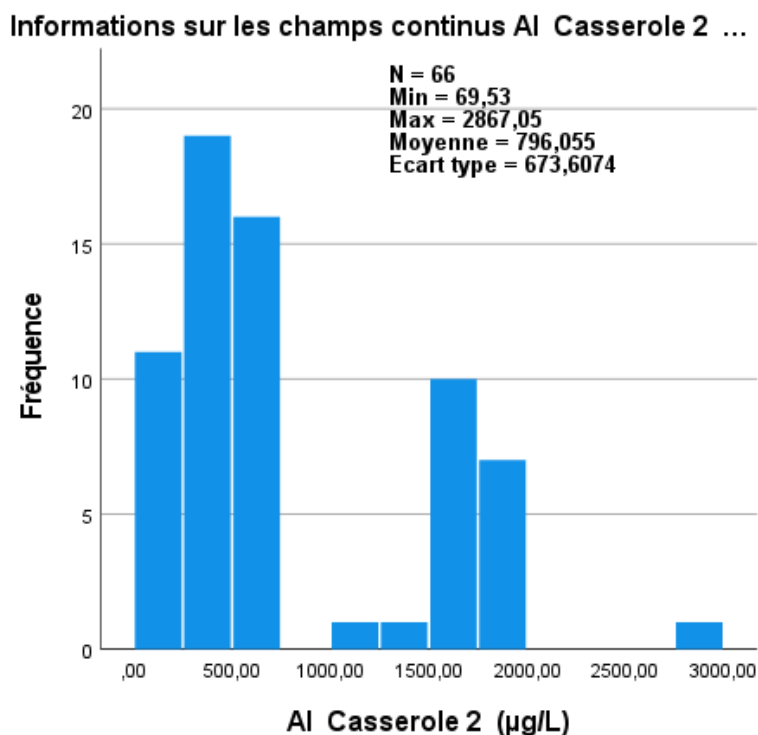


Figure 111. Distribution des concentrations en aluminium relargué dans la casserole 2.

L'histogramme de la casserole 2 révèle une distribution asymétrique des concentrations en aluminium, avec des valeurs qui atteignent jusqu'à 2867 µg/L, et une dispersion importante avec une forte variabilité des données (écart-type élevé : 673,6074 µg/L).

- **Analyse des résultats du test U de Mann-Whitney (casserole 3)**

Le test U de Mann-Whitney a également été utilisé pour analyser la distribution du relargage d'aluminium dans la casserole 3 selon le type d'eau. Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour cette comparaison.

Tableau 130. Récapitulatif du test U de Mann-Whitney-Casseroles 3.

| Paramètre | Casseroles 3 |
|------------------------------------|--------------|
| N total | 66 |
| U de Mann-Whitney | 833,500 |
| W de Wilcoxon | 1298,500 |
| Statistiques de test | 833,500 |
| Erreur standard | 77,652 |
| Statistiques de test standardisées | 3,780 |
| Sig. asymptotique (test bilatéral) | < 0,001 |

Le p-value < 0,001 indique que la différence observée dans le relargage d'aluminium entre l'eau du robinet et l'eau en bouteille est hautement significative.

Test U de Mann-Whitney pour échantillons indépendants

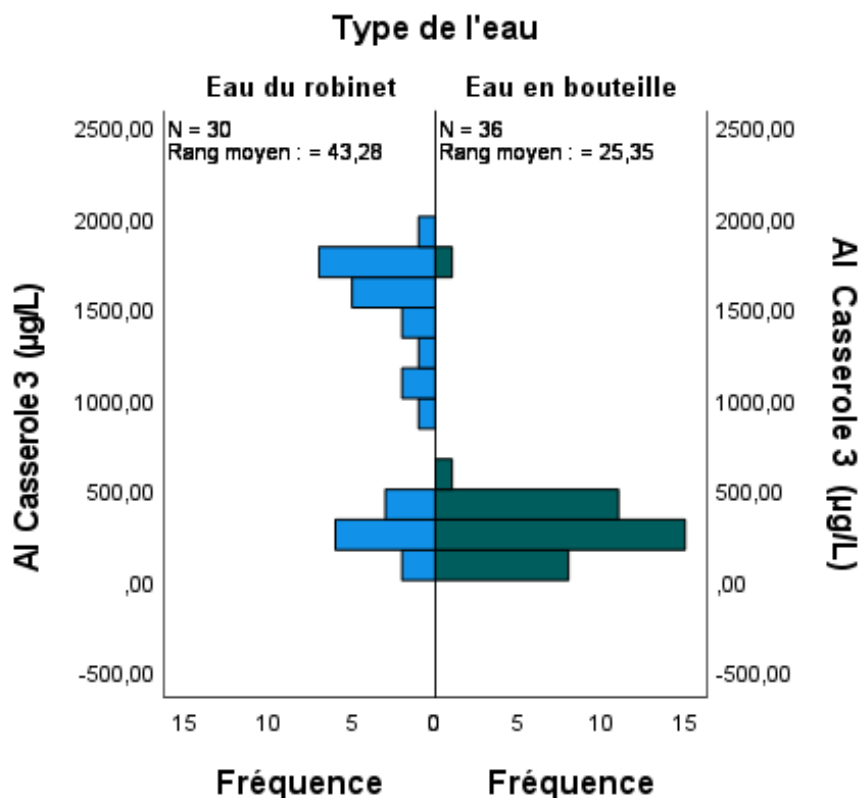


Figure 112. Comparaison du relargage d'aluminium dans la casserole 3 entre l'eau du robinet et l'eau en bouteille.

Ce graphique en barres illustre la distribution du relargage selon le type d'eau. Le rang moyen des échantillons d'eau du robinet est supérieur à celui de l'eau en bouteille. Cela signifie que l'eau du robinet entraîne un relargage plus élevé que l'eau en bouteille.

Ces résultats confirment les tendances observées pour les casseroles 1 et 2, et suggèrent que la composition chimique de l'eau joue un rôle déterminant dans le relargage de l'aluminium lors de l'ébullition.

Informations sur les champs continus Al Casserole 3 ...

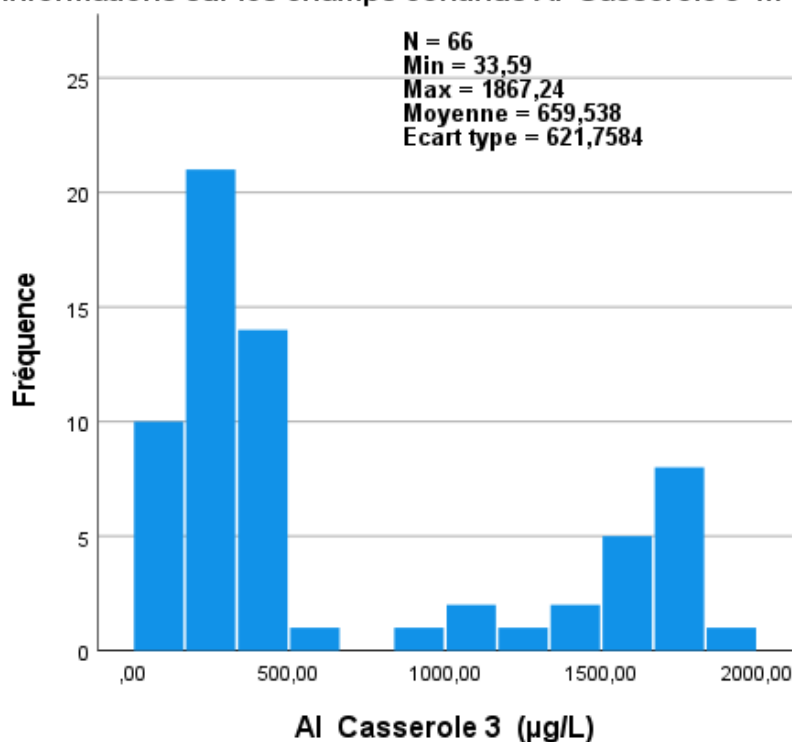


Figure 113. Distribution des concentrations en aluminium relargué dans la casserole 3.

L'histogramme montre une distribution hétérogène, avec des concentrations d'aluminium pouvant atteindre jusqu'à 2867 µg/L. L'écart-type élevé témoigne aussi d'une grande dispersion des concentrations.

Ces résultats montrent que la casserole 3, est légèrement moins affectée par la nature de l'eau que la casserole 2.

- Effets de l'ébullition sur la surface des casseroles en aluminium



Figure 114. Effets de l'ébullition sur la surface des casseroles en aluminium.

Les images prises après ébullition montrent une altération importante de la surface des casseroles, en particulier la casserole 2, qui présente des dépôts blanchâtres et une usure prononcée.

2.2. Résultats de l'analyse physico-chimique

2.2.1. Eaux minérales

Les analyses physico-chimiques des échantillons d'eaux minérales révèlent une variabilité importante entre les marques, tant en termes de minéralisation que de composition ionique (tableau 131).

Tableau 131. Paramètres physico-chimiques des eaux minérales.

| | N | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart type |
|--------------------------------------|----|---------|---------|---------|------------|
| pH | 12 | 6,98 | 7,95 | 7,5900 | 0,295 |
| Fluorures (mg/L) | 12 | 0,184 | 2,560 | 0,842 | 0,726 |
| Minéralisation globale (mg/L) | 12 | 191,04 | 1320,05 | 596,830 | 279,092 |
| Bicarbonates (mg/L) | 12 | 167,21 | 691,42 | 338,890 | 131,042 |
| Calcium (mg/L) | 12 | 50,72 | 138,45 | 82,515 | 24,293 |
| Magnésium (mg/L) | 12 | 4,20 | 76,85 | 38,125 | 18,671 |
| Chlorures (mg/L) | 12 | 6,32 | 153,84 | 66,445 | 42,000 |
| Nitrates (mg/L) | 12 | 0,00 | 38,74 | 10,816 | 10,737 |

Les résultats des échantillons d'eaux minérales montrent une variabilité dans les résultats des paramètres physico-chimiques. Le pH varie entre 6,98 et 7,95 avec une moyenne de 7,59.

La minéralisation globale est en moyenne de 596,83 mg/L. Les concentrations en fluorures varient de 0,184 à 2,56 mg/L, avec une moyenne de 0,842 mg/L.

- **Comparaison aux normes**

Tableau 132. Conformité des eaux minérales aux normes algériennes.

| Paramètre | Normes | Fréquence conforme | Fréquence non conforme |
|-----------|-----------|--------------------|------------------------|
| pH | 6,5 - 8,5 | 12 | 0 |
| Fluorures | < 5 mg/L | 12 | 0 |
| Nitrates | < 50 mg/L | 11 | 1 |

Les résultats présentés dans le Tableau 132 démontrent une conformité générale satisfaisante, avec 100 % de conformité pour le pH et les fluorures, et un seul dépassement observé pour les nitrates.

2.2.2. Eaux de source

Les eaux de source analysées présentent une composition plus homogène, bien que certaines fluctuations aient été notées selon les origines géographiques (Tableau 133).

Tableau 133. Paramètres physico-chimiques des eaux de source.

| | N | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart type |
|-------------------------------|----|---------|---------|---------|------------|
| pH | 24 | 6,210 | 8,070 | 7,421 | 0,435 |
| Fluorures (mg/L) | 24 | 0,245 | 2,440 | 1,009 | 0,562 |
| Minéralisation globale (mg/L) | 24 | 153,820 | 974,630 | 553,511 | 209,382 |
| Bicarbonates (mg/L) | 24 | 52,350 | 460,120 | 267,960 | 80,484 |
| Calcium (mg/L) | 24 | 4,810 | 140,100 | 88,307 | 27,542 |
| Magnésium (mg/L) | 24 | 1,980 | 60,580 | 26,292 | 14,295 |
| Chlorures (mg/L) | 24 | 10,890 | 201,450 | 61,557 | 42,922 |

Les valeurs de pH varient entre 6,21 et 8,07, avec une moyenne de 7,42. Les concentrations en fluorures est comprise entre 0,245 et 2,44 mg/L, avec une moyenne de 1,009 mg/L.

En ce qui concerne les bicarbonates, les valeurs varient de 52,35 à 460,12 mg/L, avec une moyenne de 267,96 mg/L. Les teneurs moyennes en calcium et en magnésium sont respectivement de 88,3 mg/L et 26,3 mg/L.

Afin d'évaluer la qualité des eaux de source analysées, leur conformité par rapport aux normes réglementaires a été examinée. Le tableau suivant présente les résultats de cette évaluation.

Tableau 134. Conformité des eaux de source.

| Paramètre | Normes | Fréquence conforme | Fréquence non conforme |
|------------------|------------|--------------------|------------------------|
| pH | 6,5 - 8,5 | 23 | 1 |
| Fluorures | < 2 mg/L | 23 | 1 |
| Calcium | < 200 mg/L | 24 | 0 |
| Magnésium | < 150 mg/L | 24 | 0 |
| Chlorures | < 500 mg/L | 24 | 0 |
| Nitrates | < 50 mg/L | 23 | 1 |

Globalement, la conformité est élevée, avec un ou deux dépassements pour les nitrates et les fluorures. Les autres paramètres respectent pleinement les normes en vigueur.

2.2.3. Eaux du robinet

Les échantillons d'eau du robinet montrent une plus grande variabilité interrégionale, notamment au niveau de la minéralisation et des chlorures. Le Tableau suivant présente les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques de l'eau du robinet.

Tableau 135. Paramètres physico-chimiques de l'eau du robinet.

| | N | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart type |
|--------------------------------------|----|---------|---------|---------|------------|
| pH | 30 | 5,860 | 8,040 | 7,436 | 0,440 |
| Fluorures (mg/L) | 30 | 0,0710 | 1,672 | 0,458 | 0,3605 |
| Minéralisation globale (mg/L) | 30 | 107,030 | 1326,17 | 524,906 | 355,230 |
| Bicarbonates (mg/L) | 30 | 8,290 | 400,340 | 167,463 | 106,734 |
| Calcium (mg/L) | 30 | 7,210 | 209,870 | 68,270 | 39,373 |
| Magnésium (mg/L) | 30 | 4,860 | 70,450 | 21,047 | 15,150 |
| Chlorures (mg/L) | 30 | 14,180 | 623,140 | 112,191 | 126,561 |
| Nitrates (mg/L) | 30 | 2,940 | 45,840 | 9,6687 | 10,384 |

- pH : Les valeurs varient entre 5,86 et 8,04, avec une moyenne de 7,436.
- Fluorures : La concentration fluctue entre 0,071 et 1,672 mg/L, avec une moyenne de 0,458 mg/L.

- Minéralisation globale : Moyenne de 524,906 mg/L, avec des valeurs allant de 107,03 à 1326,17 mg/L.
- Bicarbonates : Variations notables (8,29 à 400,34 mg/L, moyenne 167,463 mg/L).
- Calcium et Magnésium : Moyennes respectives de 68,270 mg/L et 21,047 mg/L, avec des valeurs maximales élevées (209,87 mg/L et 70,45 mg/L).
- Chlorures : Echantillons très hétérogènes (14,18 à 623,14 mg/L, moyenne 112,191 mg/L).

Le Tableau 136 synthétise les résultats de conformité des échantillons d'eau du robinet par rapport aux normes de qualité.

Tableau 136. Conformité des eaux du robinet.

| Paramètre | Normes | Fréquence conforme | Fréquence non conforme |
|---------------------|------------|--------------------|------------------------|
| pH | 6,5 - 8,5 | 28 | 2 |
| Fluorures | < 1,5 mg/L | 29 | 1 |
| Bicarbonates | > 65 mg/L | 28 | 2 |
| Calcium | < 200 mg/L | 29 | 1 |
| Magnésium | < 50 mg/L | 30 | 0 |
| Chlorures | < 500 mg/L | 29 | 1 |
| Nitrates | < 50 mg/L | 30 | 0 |

Malgré quelques dépassements ponctuels, notamment pour les chlorures et le pH, la majorité des échantillons respectent les valeurs limites réglementaires. Malgré quelques dépassements ponctuels, notamment pour les chlorures et le pH, la majorité des échantillons respectent les valeurs limites réglementaires.

2.3. Evaluation de l'adéquation des eaux aux recommandations pour la préparation des biberons

Afin de déterminer la compatibilité des différentes catégories d'eau (robinet, minérale, source) avec les recommandations en vigueur pour l'alimentation infantile, une analyse comparative des paramètres physico-chimiques a été effectuée. Cette évaluation repose sur les critères définis pour obtenir la mention réglementaire « **convient pour les nourrissons** ».

2.3.1. Eaux du robinet

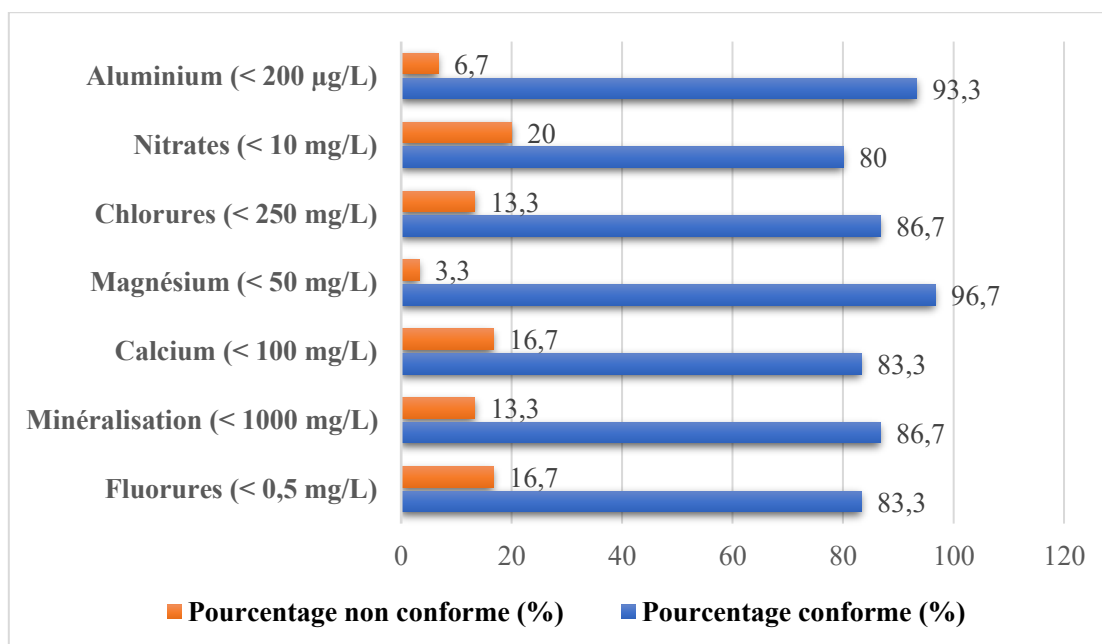


Figure 115. Conformité des échantillons d'eau du robinet aux recommandations pour la préparation des biberons.

Cette figure présente l'évaluation de la conformité des échantillons d'eau du robinet aux recommandations sanitaires applicables à la préparation des biberons pour nourrissons.

L'analyse révèle une conformité partielle :

- Les nitrates présentent un taux de conformité de 80 %, avec 20 % des échantillons dépassant la limite recommandée (< 10 mg/L).
- Les fluorures présentent un taux de conformité de 83,3 %, les dépassements étant probablement liés à des conditions géologiques.
- Les autres paramètres (calcium, magnésium, chlorures, minéralisation) respectent globalement les seuils établis.

Ces résultats montrent que, bien que la majorité des échantillons d'eau du robinet soient conformes, une vigilance particulière est requise quant à la teneur en nitrates et fluorures, susceptibles de poser des risques chez le nourrisson.

2.3.1.1. Eaux minérales

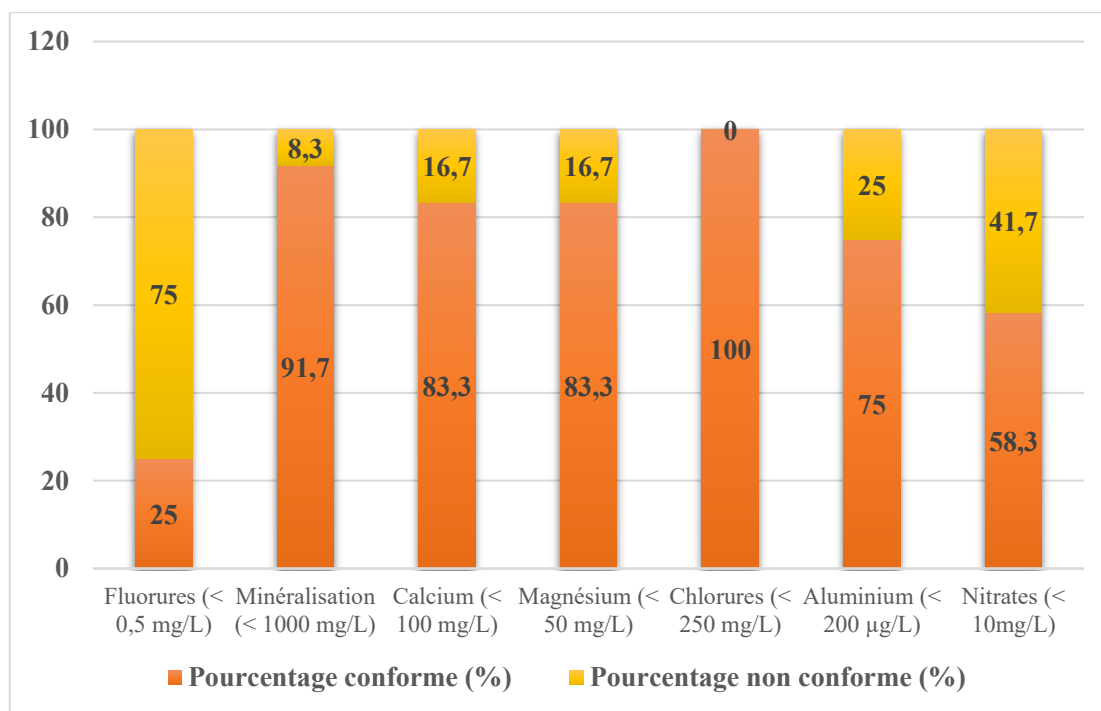


Figure 116. Taux de conformité des eaux minérales aux critères pour la préparation des biberons.

La Figure 116 présente le taux de conformité des eaux minérales analysées aux critères réglementaires et nutritionnels requis pour la préparation des biberons destinés aux nourrissons.

Les résultats indiquent :

- 100 % de conformité pour les chlorures.
- Une conformité réduite pour les fluorures : seulement 25 % des échantillons respectant la limite maximale (< 0,5 mg/L sans supplémentation fluorée). Ce paramètre constitue donc le principal facteur limitant.
- Les concentrations en aluminium et en calcium dépassent les seuils réglementaires respectivement dans 25 % et 16,7 % des cas.

En conclusion, seules quelques marques d'eaux minérales répondent à l'ensemble des exigences réglementaires, notamment : Lalla Khedidja , Messerghine et Youkous.

2.3.2. Eaux de source

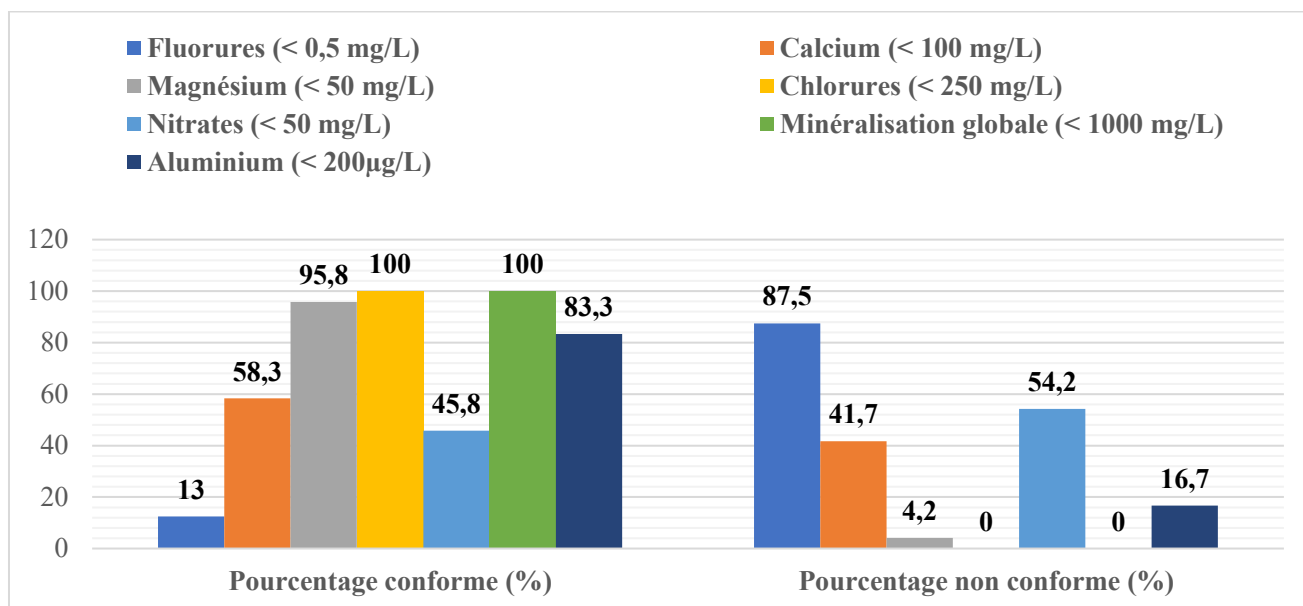


Figure 117. Conformité des eaux de source aux recommandations pour les nourrissons.

Cette figure montre :

- Une conformité totale (100 %) pour les paramètres liés à la minéralisation globale et au calcium.
- Les nitrates sont problématiques, avec seulement 45,8 % de conformité ; plus de la moitié des échantillons dépassant les 10 mg/L.
- Pour les fluorures, le taux de conformité est de 58,3 %.
- Le taux de conformité de l'aluminium est de 83,3 %, ce qui en fait un paramètre modérément préoccupant.

Les marques Ouwis, Nestlé et Toudja sont les seules à satisfaire l'ensemble des critères réglementaires applicables à l'eau utilisée pour la reconstitution des laits infantiles.

2.4. Etude chimiométrique

L'objectif de cette étude était d'explorer les relations entre les concentrations d'aluminium (avant et après ébullition) et les paramètres physico-chimiques de l'eau, en vue d'identifier les facteurs influençant le relargage de l'aluminium. Pour cela, plusieurs outils statistiques et chimiométriques ont été mobilisés

2.4.1. Validation statistique de l'ACP (KMO et Bartlett)

Avant l'application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP), deux tests ont été réalisés afin d'évaluer la pertinence des données :

Tableau 137. Résultats des Test de KMO et de Bartlett.

| Indice KMO et test de Bartlett | Valeur |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Indice KMO | 0,759 |
| Test de sphéricité de Bartlett | Khi-carré approx. = 325,416 |
| ddl | 36 |
| Signification | < 0,001 |

- L'indice **KMO = 0,759** ($> 0,5$) indique que les variables partagent une variance commune suffisante pour une ACP.
- Le test de Bartlett est très significatif ($p < 0,001$), justifiant l'existence de corrélations inter-variables.

2.4.2. Test de normalité

Tableau 138. Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk.

| Shapiro-Wilk | | | |
|------------------------------------|--------------|-----|-------|
| | Statistiques | ddl | Sig. |
| pH | 0,867 | 66 | 0,000 |
| F | 0,847 | 66 | 0,000 |
| Residu | 0,882 | 66 | 0,000 |
| HCO₃⁻ | 0,939 | 66 | 0,003 |
| Ca | 0,935 | 66 | 0,002 |
| Mg | 0,915 | 66 | 0,000 |
| Cl | 0,629 | 66 | 0,000 |
| NO₃⁻ | 0,792 | 66 | 0,000 |
| Al | 0,805 | 66 | 0,000 |
| Al₁ | 0,766 | 66 | 0,000 |
| Al₂ | 0,818 | 66 | 0,000 |
| Al₃ | 0,774 | 66 | 0,000 |

Toutes les variables étudiées présentent des p-values $< 0,05$, ce qui confirme l'absence de normalité dans les distributions. Ces résultats justifient l'utilisation d'approches statistiques non paramétriques, telles que la corrélation de Kendall (Tableau 138).

2.4.3. Analyse des corrélations entre les variables

Afin de visualiser les relations entre les variables, une carte thermique des coefficients de corrélation de Kendall Tau-b a été générée (Figure 118). Les p-values sont également présentés dans le tableau 139.

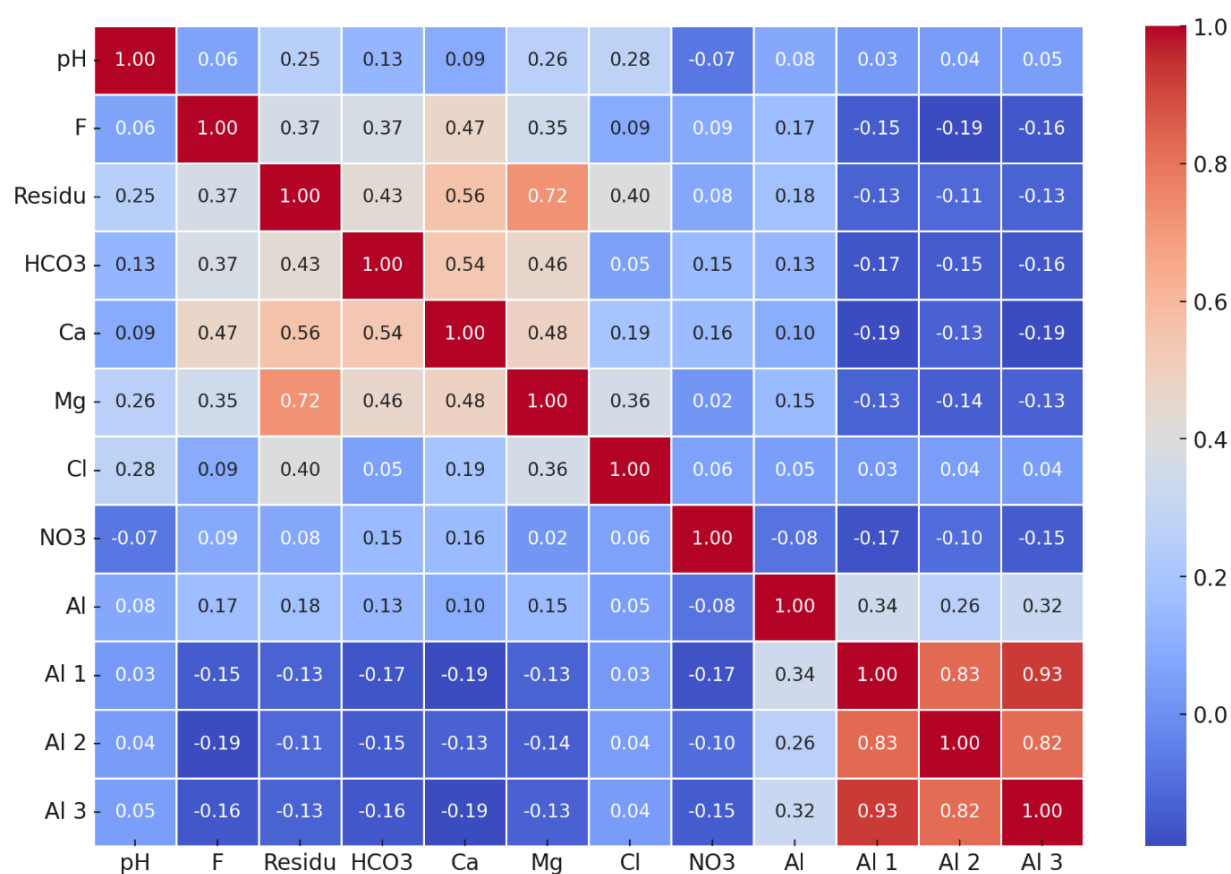


Figure 118. Carte thermique des corrélations entre paramètres physico-chimiques et formes d'aluminium.

Tableau 139. Signification statistique (p-value bilatérale) (n = 66).

| Var. | pH | F | Residu | HCO ₃ ⁻ | Ca | Mg | Cl | NO ₃ ⁻ | Al | Al ₁ | Al ₂ | Al ₃ |
|------------------------------------|-------|-------------|--------------|-------------------------------|----------|--------------|--------------|------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| pH | - | 0,46 | 0,003 | 0,122 | 0,29 | 0,002 | 0,001 | 0,39 | 0,347 | 0,70 | 0,67 | 0,58 |
| F | 0,46 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,28 | 0,306 | 0,05 | 0,08 | 0,02 | 0,05 |
| Residu | 0,00 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,367 | 0,036 | 0,13 | 0,19 | 0,12 |
| HCO₃⁻ | 0,12 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0,52 | 0,077 | 0,11 | 0,046 | 0,08 | 0,05 |
| Ca | 0,29 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0,02 | 0,065 | 0,25 | 0,023 | 0,12 | 0,02 |
| Mg | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0,833 | 0,08 | 0,12 | 0,09 | 0,12 |
| Cl | 0,003 | 0,28 | 0 | 0,52 | 0,02 | 0 | - | 0,507 | 0,58 | 0,73 | 0,60 | 0,64 |
| NO₃⁻ | 0,39 | 0,31 | 0,37 | 0,08 | 0,06 | 0,83 | 0,51 | - | 0,32 | 0,04 | 0,23 | 0,08 |
| Al | 0,35 | 0,05 | 0,04 | 0,11 | 0,25 | 0,08 | 0,58 | 0,324 | - | 0 | 0,002 | 0 |
| Al₁ | 0,7 | 0,08 | 0,13 | 0,05 | 0,02 | 0,12 | 0,73 | 0,045 | 0 | - | 0 | 0 |
| Al₂ | 0,67 | 0,02 | 0,19 | 0,08 | 0,12 | 0,09 | 0,60 | 0,232 | 0,002 | 0 | - | 0 |
| Al₃ | 0,580 | 0,053 | 0,124 | 0,053 | 0,023 | 0,12 | 0,65 | 0,082 | 0 | 0 | 0 | - |

- Corrélations significatives :
 - **Aluminium vs HCO₃⁻** : positive et significative (p = 0,046).
 - **Aluminium vs F⁻** : significative (p = 0,02).
 - **Aluminium vs Ca²⁺** : significative (p = 0,023).
 - **Aluminium vs minéralisation** : significative (p = 0,036).
- Corrélations faibles ou non significatives :
 - **Aluminium vs pH** : p = 0,35
 - **Aluminium vs Cl⁻ et Mg²⁺** : non significatives
 - **Aluminium vs NO₃⁻** : p = 0,45

Ces résultats indiquent que certains paramètres (notamment les bicarbonates et les fluorures) jouent un rôle probable dans le comportement de l'aluminium.

2.4.4. Analyse par régression linéaire multiple

Des régressions linéaires multiples ont été réalisées pour identifier les prédicteurs significatifs de l'aluminium total et des formes post-ébullition. Les principaux résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 140. Résultats de l'ANOVA et des coefficients de régression (Al).

| Modèle | Somme des carrés | ddl | Carré moyen | F | Sig. |
|------------|------------------|-----|-------------|--------|-------|
| Régression | 113721,525 | 1 | 113721,525 | 13,334 | 0,001 |
| de Student | 545852,176 | 64 | 8528,940 | - | - |
| Total | 659573,701 | 65 | - | - | - |

| | | | Coefficients standardisés | t | Sig. |
|-------------------------------|--------|--------|---------------------------|-------|-------|
| | | | Bêta | - | - |
| (Constante) | 44,933 | 24,905 | - | 1,804 | 0,076 |
| HCO ₃ ⁻ | 0,344 | 0,094 | 0,415 | 3,652 | 0,001 |

Tableau 141. Résultats de l'ANOVA et des coefficients de régression (Al₁).

| Modèle | Somme des carrés | ddl | Carré moyen | F | Sig. |
|------------|------------------|-----|-------------|--------|-------|
| Régression | 3743592,877 | 1 | 3743592,877 | 10,902 | 0,002 |
| de Student | 21976383,451 | 64 | 343380,991 | - | - |
| Total | 25719976,328 | 65 | - | - | - |

| | | | Coefficients standardisés | t | Sig. |
|-------------------------------|----------|---------|---------------------------|--------|-------|
| | | | Bêta | | |
| (Constante) | 1115,653 | 158,025 | - | 7,060 | 0,000 |
| HCO ₃ ⁻ | -1,974 | 0,598 | -0,382 | -3,302 | 0,002 |

Tableau 142. Résultats de l'ANOVA et des coefficients de régression (Al₂).

| Modèle | Somme des carrés | ddl | Carré moyen | F | Sig. |
|------------|------------------|-----|-------------|-------|-------|
| Régression | 3231203,927 | 1 | 3231203,927 | 7,874 | 0,007 |
| de Student | 26262342,938 | 64 | 410349,108 | - | - |
| Total | 29493546,865 | 65 | - | - | - |

| | | | Coefficients standardisés | t | Sig. |
|-------------|----------|---------|---------------------------|--------|-------|
| | | | Bêta | - | - |
| (Constante) | 1081,348 | 128,662 | - | 8,405 | 0,000 |
| F | -391,600 | 139,552 | -0,331 | -2,806 | 0,007 |

Tableau 143. Résultats de l'ANOVA et des coefficients de régression (Al₃).

| Modèle | Somme des carrés | ddl | Carré moyen | F | Sig. |
|------------|------------------|-----|-------------|--------|-------|
| Régression | 3445876,153 | 1 | 3445876,153 | 10,171 | 0,002 |
| de Student | 21682049,151 | 64 | 338782,018 | - | - |
| Total | 25127925,304 | 65 | - | - | - |

| | | | Coefficients standardisés | t | Sig. |
|-------------------------------|----------|---------|---------------------------|--------|-------|
| | | | Bêta | | |
| (Constante) | 1104,942 | 156,963 | - | 7,040 | 0,000 |
| HCO ₃ ⁻ | -1,894 | 0,594 | -0,370 | -3,189 | 0,002 |

- Aluminium avant chauffage (Al)
 - Le HCO₃⁻ est un prédicteur significatif ($\beta = 0,415$, $p = 0,001$).
 - Modèle globalement significatif ($F = 13,334$, $p = 0,001$).
- Post-ébullition de l'aluminium (Al₁, Al₂, Al₃)
 - Al₁ et Al₃ : corrélation négative avec les bicarbonates.
 - Al₂ : influence négative significative du fluor ($\beta = -0,331$, $p = 0,007$).

Ces régressions renforcent l'hypothèse d'un effet neutralisant potentiel des bicarbonates et fluorures vis-à-vis de la solubilisation de l'aluminium.

2.4.5. Distribution de l'inertie

Tableau 144. Variance expliquée par les composantes principales.

| N° | Variable | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 |
|----|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | pH | 4,02 | 8,36 | 8,66 | 15,68 | 06,29 |
| 2 | Fluorures | 6,47 | 0,13 | 10,67 | 4,82 | 64,52 |
| 3 | Résidu | 14,28 | 5,64 | 3,17 | 1,16 | 01,84 |
| 4 | HCO ₃ ⁻ | 13,70 | 1,43 | 11,00 | 1,03 | 7,51 |
| 5 | Calcium | 13,94 | 2,31 | 0,07 | 0,47 | 0,02 |
| 6 | Magnésium | 14,17 | 4,98 | 0,12 | 0,35 | 0,75 |
| 7 | Chlorures | 6,53 | 4,21 | 25,66 | 10,07 | 0,20 |
| 8 | Nitrates | 2,85 | 1,21 | 5,70 | 62,84 | 6,08 |
| 9 | Al | 0,28 | 11,54 | 34,65 | 0,32 | 7,98 |
| 10 | Al ₁ | 8,82 | 18,9 | 0,01 | 0,62 | 2,29 |
| 11 | Al ₂ | 6,28 | 22,36 | 0,30 | 1,85 | 0,30 |
| 12 | Al ₃ | 8,65 | 18,93 | 0,01 | 0,79 | 2,22 |

Le graphe ci-dessous illustre visuellement la répartition de l'inertie.

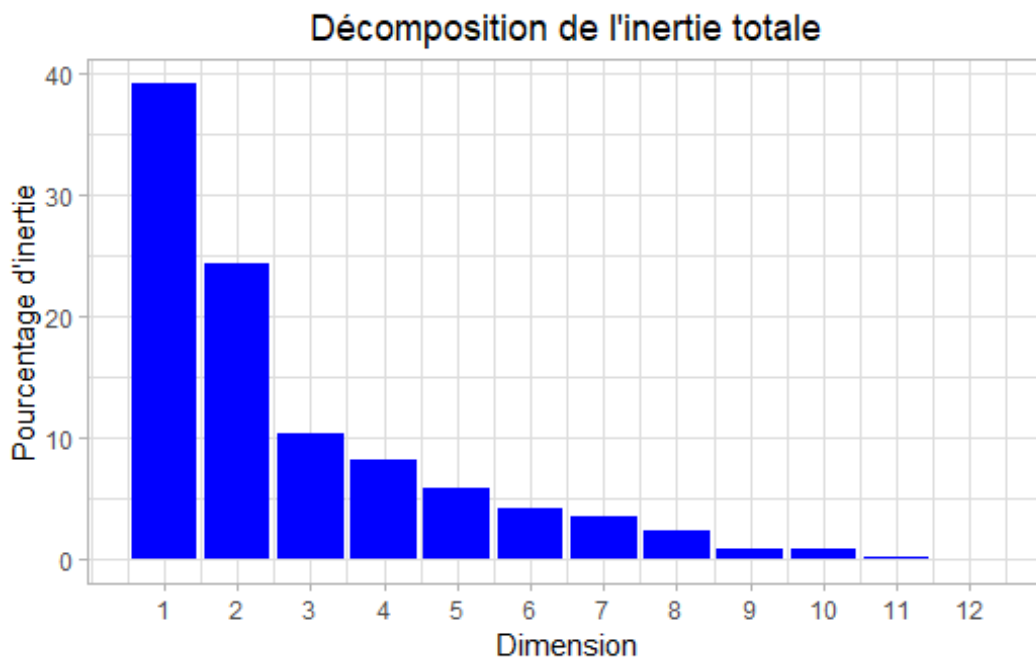


Figure 119. Décomposition de l'inertie totale.

Les 2 premiers axes de l'analyse expriment 63,55% de l'inertie totale du jeu de données ; cela signifie que 63,55% de la variabilité totale du nuage des variables est représentée dans ce plan. C'est un pourcentage assez important, et le premier plan représente donc convenablement la variabilité contenue dans une grande part du jeu de données actif.

Cette valeur est nettement supérieure à la valeur référence de 29,77%, la variabilité expliquée par ce plan est donc hautement significative (cette inertie de référence est le quantile 0,95-quantile de la distribution des pourcentages d'inertie obtenue en simulant 1373 jeux de données aléatoires de dimensions comparables sur la base d'une distribution normale).

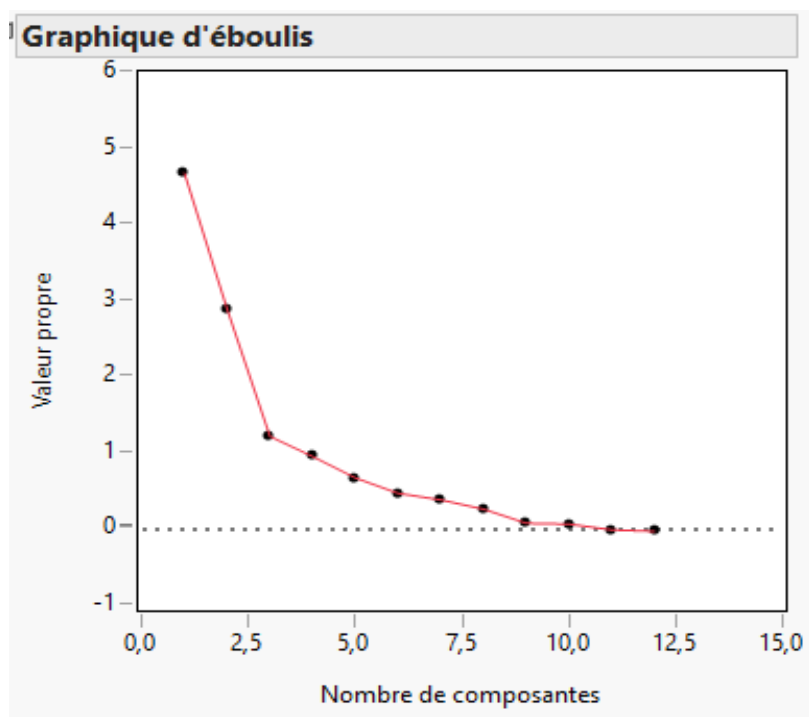


Figure 120. Tracé d'effondrement (Scree plot).

Le tracé d'effondrement permet de visualiser le nombre optimal de composantes principales à retenir (Figure 120). D'après ce graphe, une inflexion nette après la 3^{ème} composante, ce qui confirme qu'il est intéressant de retenir 3 facteurs principaux. Du fait de ces observations, il serait tout de même préférable de considérer également dans l'analyse, la troisième dimension.

Tableau 145. Variance expliquée par les composantes principales (CP).

| Numéro de composante | Valeur propre | Pourcentage de variance expliquée |
|----------------------|---------------|-----------------------------------|
| 1 | 4,706 | 39,22% |
| 2 | 2,919 | 24,33% |
| 3 | 1,249 | 10,41% |

Le Tableau 145 présente la variance expliquée par les trois premières composantes principales (CP) issues de l'analyse en composantes principales (ACP). La Dim.3 (composante 3) ajoute 10,41 % de variance supplémentaire. Elle apporte ainsi une contribution significative, notamment en lien avec l'aluminium et certains paramètres physico-chimiques comme les nitrates et les fluorures.

2.4.6. Description des plans factoriels

2.4.6.1. Description du plan 1 : 2

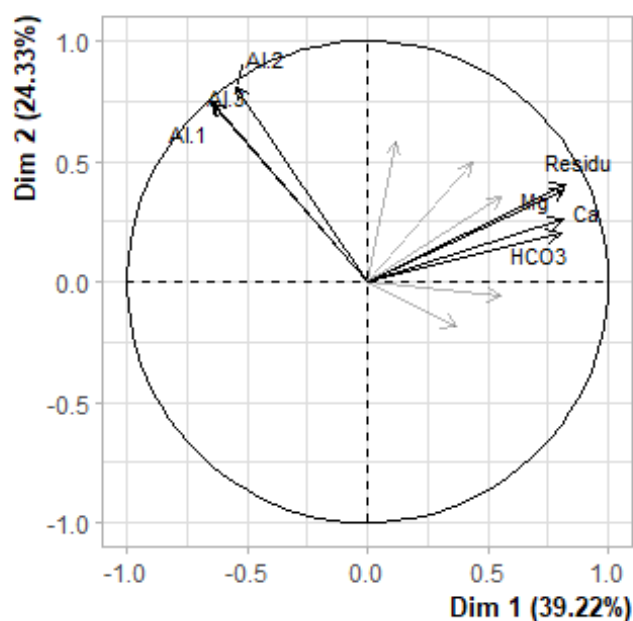


Figure 121. Graphe des variables (ACP)

Les variables libellées sont celles les mieux représentées sur le plan.

Le graphe illustre les relations entre les variables physico-chimiques et l'aluminium sur les deux premiers axes principaux de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Les flèches longues et bien projetées sur les axes principaux indiquent des variables bien représentées et ayant une forte influence sur la structuration des données.

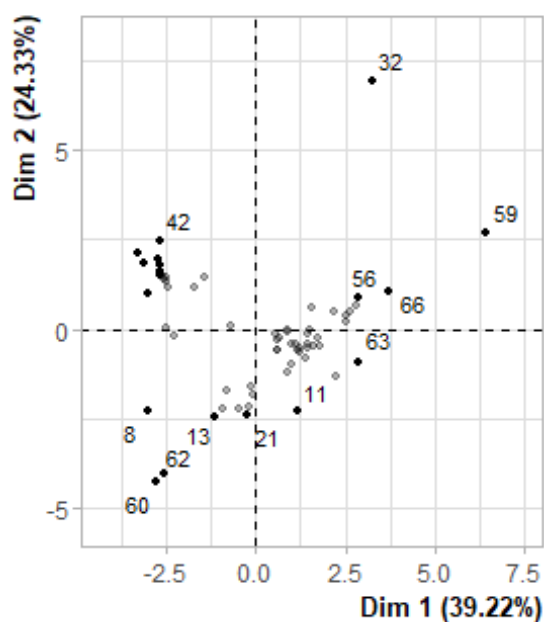


Figure 122. Graphe des individus (ACP)

Les individus libellés sont ceux ayant la plus grande contribution à la construction du plan.

Le test de Wilks permet d'identifier la variable qui sépare le mieux les individus dans cet espace factoriel, c'est-à-dire celle qui explique le mieux les différences observées entre les groupes.

Il n'y a qu'une unique variable qualitative possible pour illustrer les distances entre individus : Nature de l'eau (B, BF, F, M, S).

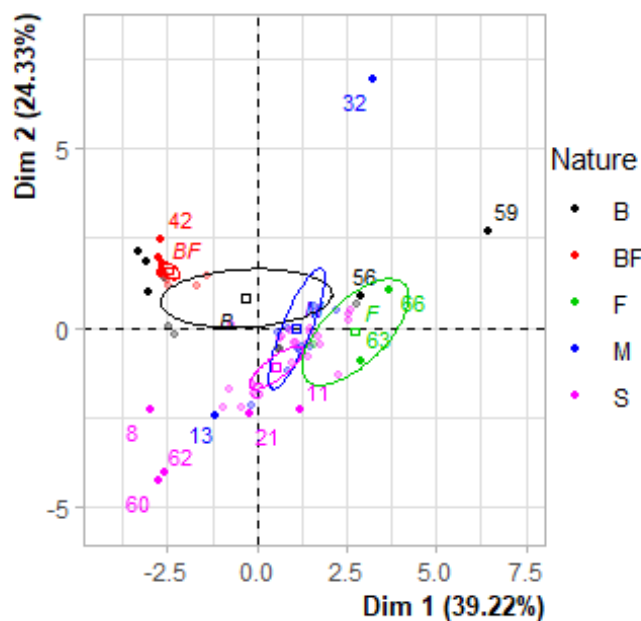


Figure 123. Graphe des individus (ACP).

Les individus libellés sont ceux ayant la plus grande contribution à la construction du plan. Les individus sont colorés selon leur appartenance aux modalités de la variable Nature (Figure 123).

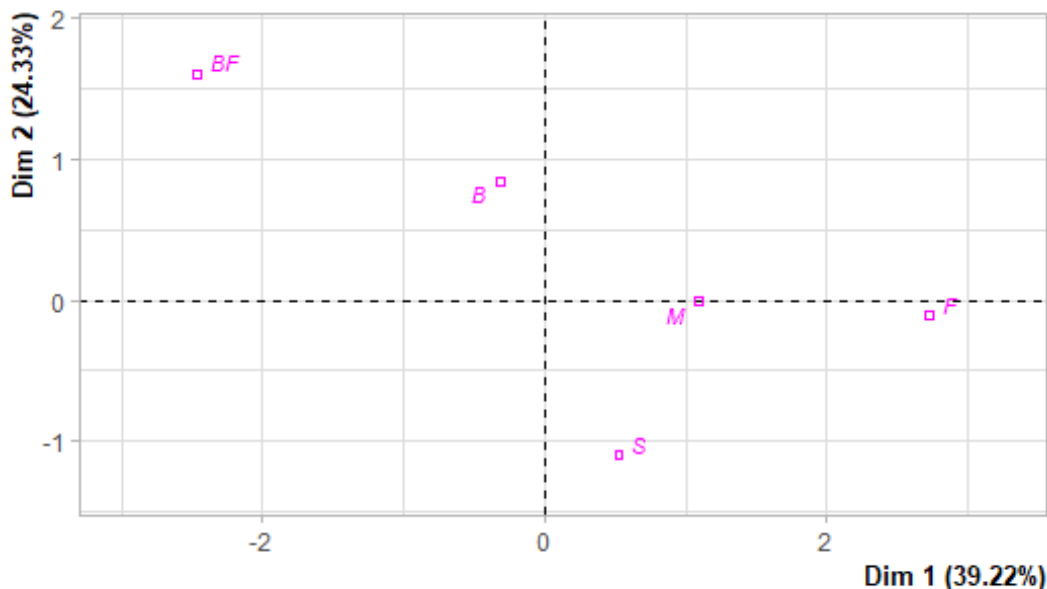


Figure 124. Graphe des modalités (ACP)

Les facteurs libellés sont ceux les mieux représentés sur le plan.

La projection des individus dans l'espace factoriel met en évidence une structuration des échantillons selon leurs caractéristiques physico-chimiques.

- **Dimension 1 (39,22 % de la variance expliquée)**

Oppose deux groupes distincts :

- **A droite du graphe** : Individus caractérisés par des valeurs élevées en résidu, magnésium (Mg), bicarbonates (HCO_3^-), calcium (Ca), chlorures (Cl), nitrates (NO_3^-), fluorures (F), pH et aluminium (Al).
- **A gauche du graphe** : Individus avec des valeurs plus élevées en Al₁, Al₂ et Al₃ et des valeurs plus faibles en NO_3^- , HCO_3^- et F.

- **Dimension 2 (24,33 % de la variance expliquée)**

Sépare les individus en fonction de la distribution des formes d'aluminium :

- **En haut du graphe** : Fortes concentrations en Al₁, Al₂ et Al₃.
- **En bas du graphe** : Faibles concentrations en Al₁, Al₂ et Al₃, mais aussi en NO_3^- , HCO_3^- et F.

2.4.6.2. Description du plan 1 : 3

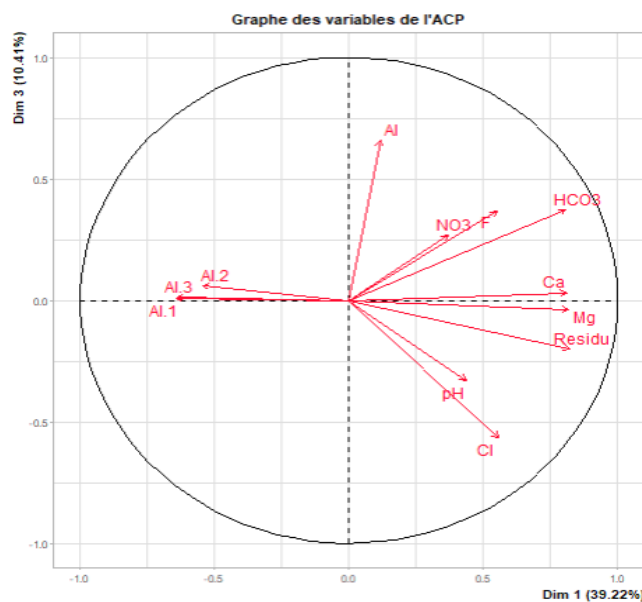


Figure 125. Cercle des corrélations des variables sur les axes 1 et 3 de l'ACP.

Ce graphe illustre la projection des variables dans l'espace factoriel défini par la Dimension 1 (39,22%) et la Dimension 3 (10,41%) de l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

La Dimension 3 est fortement corrélée avec l'aluminium, les fluorures et les bicarbonates.

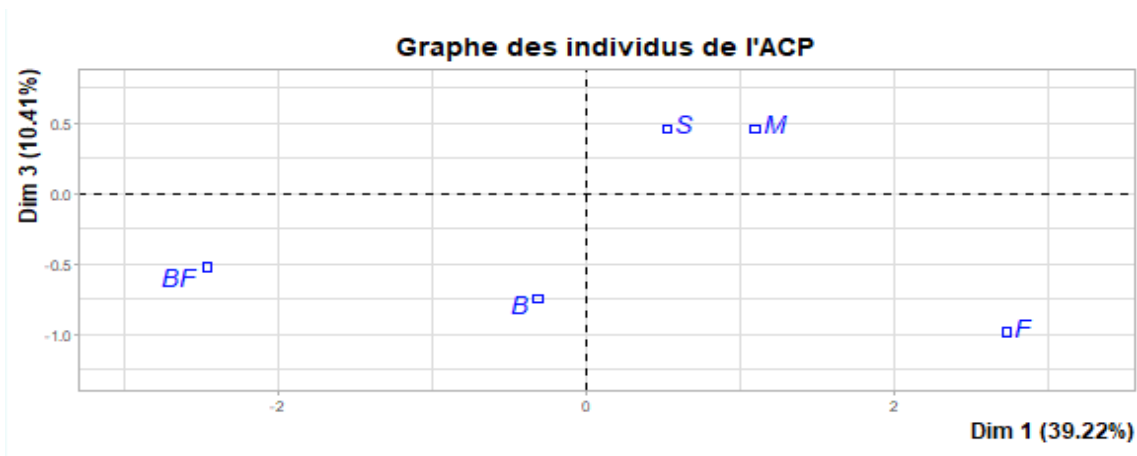


Figure 126. Projection des individus dans le plan factoriel (Dim 1 et Dim 3) de l'ACP.

Ce graphe représente la distribution des individus (types d'eau) dans l'espace factoriel défini par la Dimension 1 (39,22%) et la Dimension 3 (10,41%) de l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

- **Les eaux de source (S) et minérales (M)** sont situées dans la partie supérieure du graphique, ce qui indique qu'elles sont influencées par la Dimension 3, qui est principalement corrélée aux fluorures (F^-) et aux bicarbonates (cf. cercle des corrélations).
- **Les eaux de barrage (B) et les mélanges (BF)** se positionnent dans la partie inférieure gauche ce qui fait qu'elles sont caractérisées par des concentrations plus faibles en fluorures et nitrates.
- **Les eaux de forage (F)** sont situées dans l'extrême droite. Elles sont donc principalement influencées par la Dimension 1, qui regroupe des paramètres comme la minéralisation et les ions majeurs.

2.4.6.3. Description du plan 2 : 3

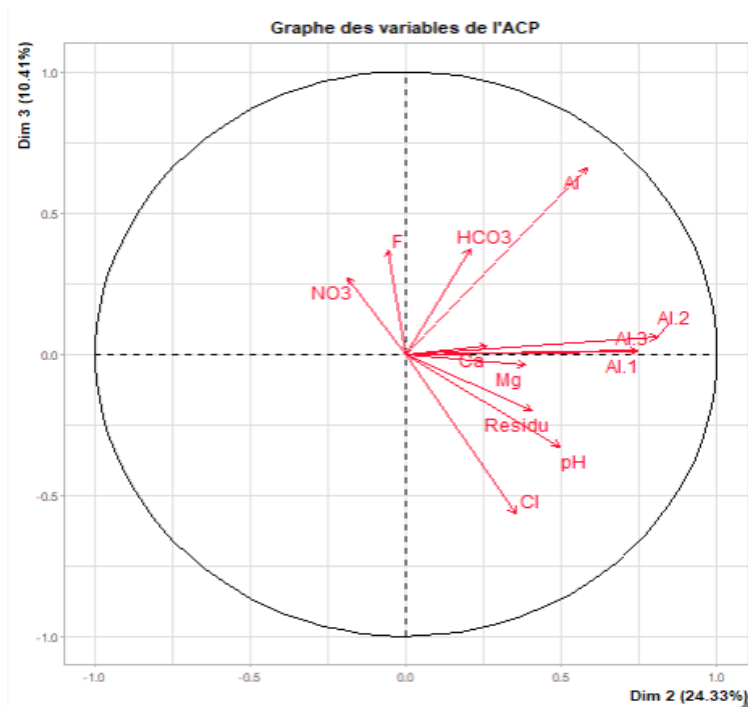


Figure 127. Cercle des corrélations des variables dans le plan factoriel (Dim 2 et Dim 3) de l'ACP.

Ce graphe montre la contribution des variables dans l'espace défini par la Dimension 2 (24,33%) et la Dimension 3 (10,41%) de l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

- **Les fluorures (F^-) et les nitrates (NO_3^-)** sont fortement corrélés à la Dimension 3.
- **Le bicarbonate (HCO_3^-)** est également bien représenté sur cet axe.

- Les différentes formes d'aluminium (Al, Al₁, Al₂, Al₃) sont projetées vers la droite avec une faible contribution à cette dimension. Leur variance est ainsi moins expliquée par la combinaison des Dim.3 et Dim.2.

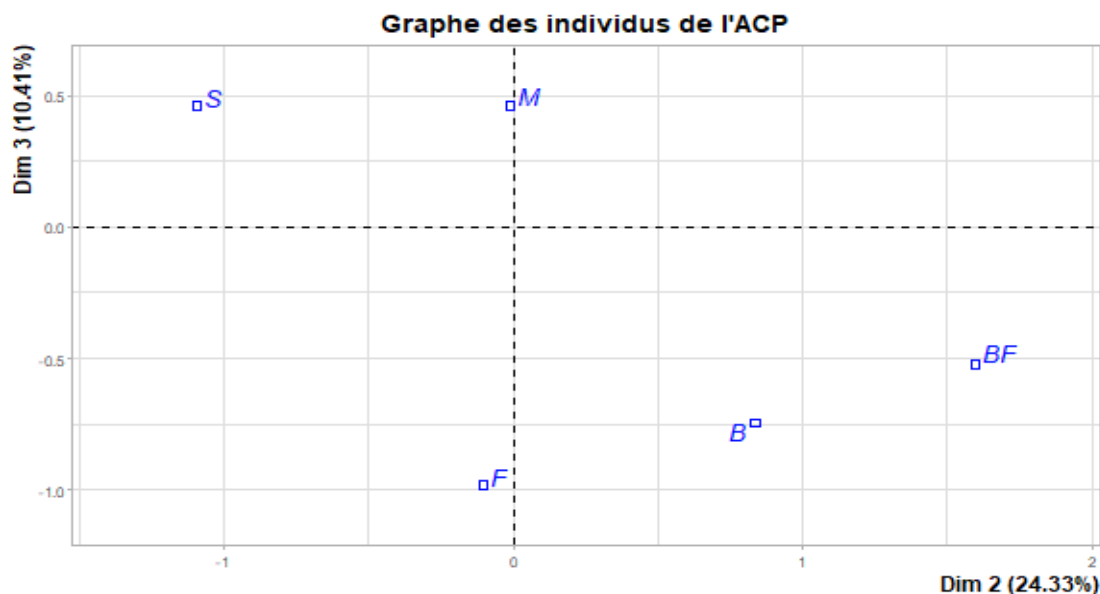


Figure 128. Graphe des individus dans le plan factoriel (Dim 2 et Dim 3) de l'ACP.

Ce graphe montre la distribution des types d'eau dans l'espace défini par les Dimensions 2 (24,33%) et 3 (10,41%) de l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

- Les eaux minérales (M) et les eaux de source (S) sont situées dans la partie supérieure du graphe, ce qui indique une contribution positive à la Dimension 3. Ces eaux sont probablement associées aux fluorures (F⁻) et aux nitrates (NO₃⁻), comme observé précédemment dans le cercle des corrélations.
- Les eaux de forage (F) sont situées en bas du graphe, ce qui indique une corrélation négative avec la Dimension 3. Elles contiennent généralement moins de fluorures et de nitrates que les autres types d'eau.
- Les eaux de barrage (B) et les eaux mélangées (BF) sont positionnées sur la droite du graphe, et donc une plus grande influence de la Dimension 2, qui est principalement corrélée aux paramètres comme le résidu sec, le magnésium, les chlorures et le pH.

2.4.7. Résultat de l'ACH

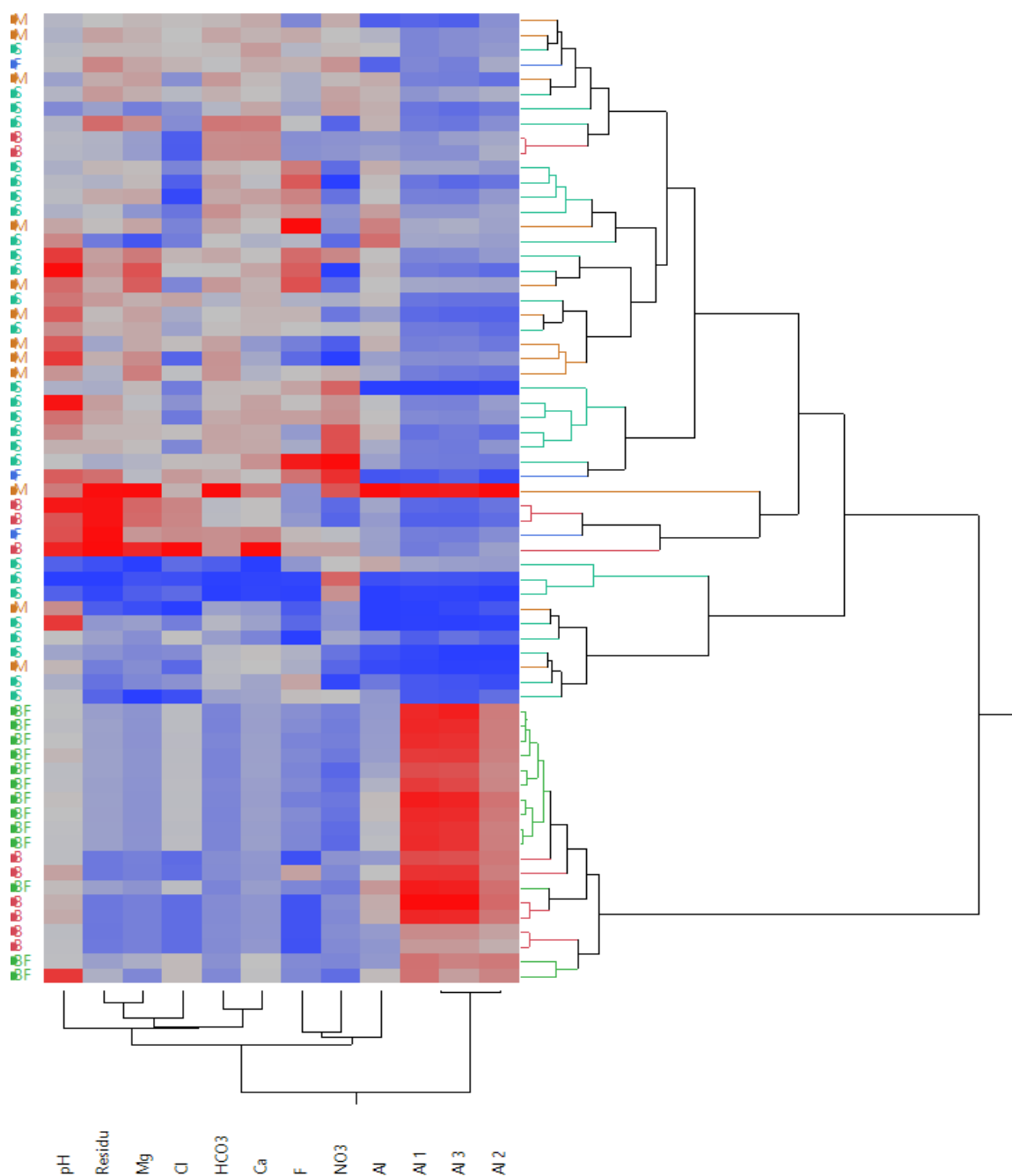


Figure 129. Classification hiérarchique des échantillons d'eau et de leurs paramètres physico-chimiques.

Rouge : Forte corrélation positive. **Bleu** : Forte corrélation négative. **Gris** : Absence ou faible corrélation.

Cette carte thermique (heatmap) représente les corrélations entre les paramètres physico-chimiques de l'eau et les différentes formes d'aluminium avant et après ébullition (Al, Al₁, Al₂, Al₃).

Les concentrations en aluminium après ébullition (Al_1 , Al_2 , Al_3) sont négativement corrélées aux bicarbonates (HCO_3^-).

Les eaux fortement minéralisées (échantillons classés en M et F) se regroupent différemment des eaux de barrage et mélangées (B et BF).

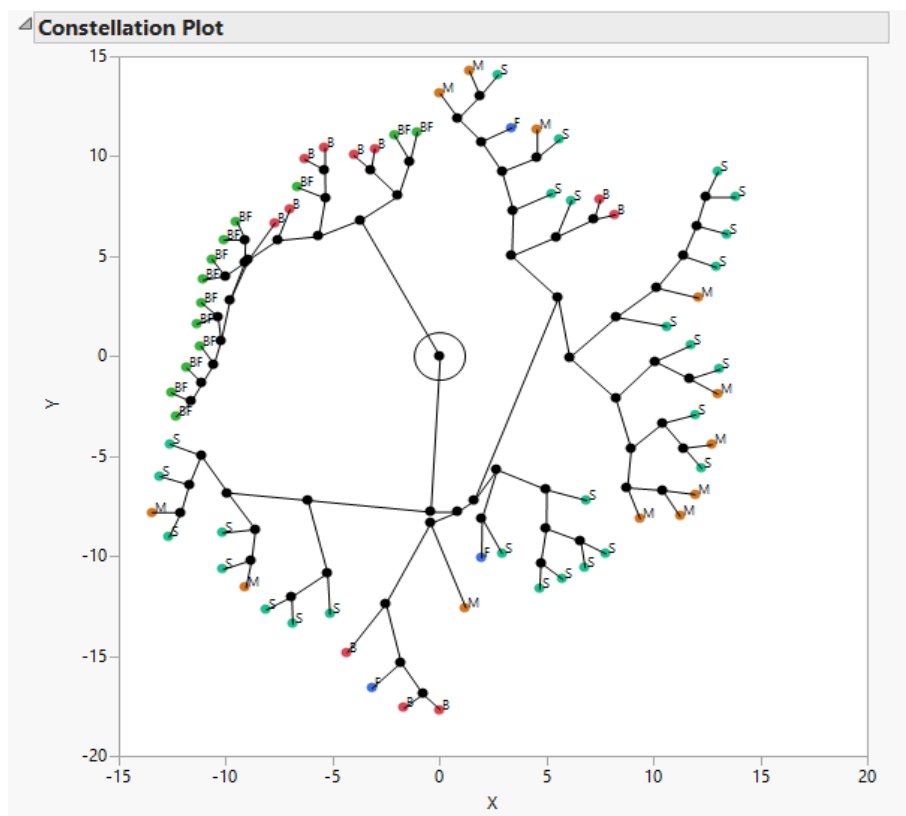


Figure 130. Constellation Plot des échantillons d'eau selon leur composition chimique.

Cette figure représente les relations de similarité entre les échantillons d'eau analysés en fonction de leurs paramètres physico-chimiques. Les différents types d'eau sont identifiés par des couleurs et des labels :

- Les eaux de barrage (B) et mélangées (BF) forment un groupement bien défini. Elles indiquent une composition chimique proche et un comportement commun au relargage d'aluminium après ébullition.
- Les eaux minérales (M) apparaissent comme un groupe distinct et se caractérisent par leur forte minéralisation et leur résistance à la solubilisation de l'aluminium.
- Les eaux de source (S) et de forage (F) sont plus dispersées. Elles montrent une variabilité plus importante de leur composition chimique.

3. Discussion

3.1. Etude du relargage de l'aluminium

L'analyse du relargage de l'aluminium lors de l'ébullition de l'eau dans des casseroles en aluminium a révélé des concentrations particulièrement élevées, dépassant souvent les limites recommandées pour l'eau potable, notamment après seulement une minute d'ébullition. Ces observations corroborent les données de la littérature, qui indiquent qu'une cuisson dans une casserole en aluminium peut libérer jusqu'à 1,5 mg/L d'aluminium, avec des valeurs extrêmes atteignant 5 mg/L selon la nature de l'eau et la qualité de l'alliage métallique. La température et la durée de stockage influencent également fortement la migration de l'aluminium [115].

Dans la présente étude, l'eau du robinet s'est révélée être le type d'eau le plus favorable au relargage de l'aluminium, avec des hausses post-élévation dépassant parfois 1000 % par rapport aux niveaux initiaux. La casserole 2, de fabrication privée algérienne, a généré les concentrations les plus élevées (moyenne : 1207,05 µg/L), ce qui pourrait être attribuée à une moindre inertie de surface, une usure plus rapide, ou des caractéristiques métallurgiques défavorables.

La variabilité du relargage enregistrée selon l'origine de l'eau est également significative. Les eaux de surface et les mélanges forage-surface induisent les plus fortes migrations d'aluminium, probablement en raison de leur composition spécifique, susceptibles de modifier le pH ou de favoriser la dissolution des oxydes d'aluminium.

En comparaison, les eaux minérales et de source se montrent moins agressives envers le matériau, bien que le relargage reste préoccupant, avec des valeurs moyennes de 392 à 581 µg/L selon la casserole. L'origine géographique des eaux semble également jouer un rôle : les eaux du bassin Sahara ont montré un potentiel de relargage plus élevé, sans doute lié à leur forte minéralisation.

L'analyse comparative du relargage d'aluminium entre les eaux conditionnées (en bouteille) et les eaux du robinet a révélé une dissolution plus importante de l'aluminium dans les eaux du robinet, particulièrement celles provenant des eaux de surface. Ce phénomène pourrait être attribué à l'utilisation de sels d'aluminium dans le traitement des eaux et à des interactions physico-chimiques lors de l'ébullition.

Ces résultats confirment que la combinaison du type de casserole, de la nature chimique de l'eau et de la durée de l'ébullition constitue un facteur de risque majeur pour l'exposition infantile à l'aluminium, ce qui justifie une vigilance accrue, notamment pour les nourrissons.

3.2. Résultats de l'analyse physicochimique

L'évaluation physicochimique a permis de caractériser la qualité des différentes eaux analysées. Les eaux minérales présentent une grande diversité de profils, avec des minéralisations pouvant atteindre 1320 mg/L. Cette richesse minérale peut être bénéfique pour certaines populations, mais contre-indiquer leur utilisation chez les nourrissons en raison du risque de surcharge rénale. L'EFSA et l'OMS recommande des eaux faiblement minéralisées (<500 mg/L) pour la préparation des biberons, ce qui confirme que certaines de ces eaux ne sont pas adaptées à cet usage [285].

En particulier, la concentration en fluorures, avec une moyenne de 0,84 mg/L et des extrêmes atteignant 2,56 mg/L, soulève des préoccupations de santé publique. L'OMS recommande un seuil < 0,7 mg/L pour les nourrissons afin de prévenir tout risque de fluorose. L'analyse a révélé un seul dépassement pour les nitrates (>50 mg/L) et que 25 % des eaux minérales dépassait également la limite de 200 µg/L pour l'aluminium.

Les eaux de source se caractérisent par une meilleure homogénéité chimique, bien qu'un échantillon ait dépassé la limite réglementaire pour les fluorures (> 2 mg/L) et également pour les nitrates (> 50 mg/L). Leurs valeurs de minéralisation sont comprises entre 153 et 974 mg/L, ce qui les rend théoriquement plus adaptés, sous réserve du respect des seuils pour les nitrates et fluorures. Les teneurs moyennes en calcium et magnésium sont respectivement 88,3 mg/L et 26,3 mg/L, ce qui est conforme aux recommandations. Le pH est conforme pour 23 échantillons sur 24, il s'agit d'une eau légèrement acide (Ain Bouglez) ce qui est souvent observé dans les eaux de source ayant une dureté très faible.

Quant aux eaux du robinet, elles montrent une plus grande hétérogénéité. Plusieurs échantillons dépassent les normes pour les chlorures, les bicarbonates ou les fluorures, ce qui reflète la diversité des sources d'approvisionnement (barrage, forage, source) et les méthodes de traitements utilisés (notamment la floculation à l'aluminium dans certaines stations).

La minéralisation varie entre 107,03 et 1326,17 mg/L, avec une moyenne de 524,90 mg/L, ce qui est élevé pour certains échantillons. Le calcium et le magnésium varient fortement, 209,87 mg/L pour le calcium et 70,45 mg/L pour le magnésium. Les chlorures présentent une forte variabilité (14,18 et 623,14 mg/L) montrant des différences notables entre les réseaux d'approvisionnement. Le pH varie entre 5,86 et 8,04, ce qui signifie que deux échantillons sont en dehors des normes (pH < 6,5). Il s'agit d'eaux qui alimentent la commune de Seraïdi. Tous les échantillons respectent les limites pour les nitrates (<50 mg/L). Les fluorures sont présents

en quantités modérées, avec une moyenne de 0,458 mg/L. Un seul échantillon dépasse la limite de 1,5 mg/L. Le calcium, le magnésium et les chlorures sont conformes dans la majorité des échantillons. Les valeurs extrêmes ont été enregistrées dans les eaux qui alimentent principalement les communes de Berrahel et d'Oued Aneb (Draa Erriche). Ces eaux proviennent du forage Guerbès-Sanhaja, situé à Skikda, connu pour ses teneurs élevées en chlorures et en sodium. Selon *Azaizia Hedda et al. (2013)*, les eaux de ce forage présentent un faciès chimique varié, comprenant celui Chloruré magnésien, Chloruré calcique, Bicarbonaté magnésien et Sulfaté magnésien. Les teneurs en chlorures y sont particulièrement élevées, pouvant atteindre plus de 700 mg/L, dépassant ainsi la norme algérienne (fixée à un maximum de 500 mg/L) et la norme de l'OMS (250 mg/L) [286].

3.3. Adéquation des eaux aux recommandations pour la préparation des biberons

L'analyse de conformité des différentes eaux aux critères spécifiques pour la préparation des biberons met en évidence de nombreux écarts. Les principaux paramètres limitant sont les nitrates, les fluorures et l'aluminium.

- Pour l'eau du robinet, bien que la plupart des échantillons soient conformes en pH, calcium et magnésium, 20 % dépassant les seuils pour les nitrates, et 16,7 % pour les fluorures. Cette situation est préoccupante compte tenu de la méthémoglobinémie infantile associée aux nitrates élevés et le risque de fluorose dentaire en cas de consommation prolongée.

- Les eaux minérales présentent une conformité très faible pour les fluorures (25 % seulement). L'aluminium dépasse également les seuils dans 25% des cas. La forte variabilité observée dans les concentrations en fluorures et en aluminium confirme la nécessité d'un étiquetage plus clair sur les eaux adaptées aux nourrissons.

- Les eaux de source, bien qu'en apparence plus favorables, présentent une non-conformité marquée pour les nitrates (conformité de 45,8 % seulement) et des dépassements pour les fluorures dans 41,7 % des échantillons. Il est essentiel de souligner que des concentrations en nitrates supérieures à 50 mg/L peuvent être observées dans les eaux souterraines sans que cela soit nécessairement un signe de pollution [105].

Globalement, très peu de marques répondent simultanément à tous les critères exigés pour un usage infantile. Seules les eaux Lalla Khedidja, Messerghine et Youkous (minérales), ainsi que Ouwis, Nestlé et Toudja (sources), se sont présentées entièrement conformes aux recommandations.

3.4. Analyse chimiométrique

- **Analyse des relations entre aluminium et les paramètres physico-chimiques**

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été menée afin de mieux comprendre les facteurs déterminants de la concentration en aluminium dans les échantillons d'eau analysés avant et après ébullition, ainsi que d'identifier les corrélations potentielles avec les caractéristiques physico-chimiques. L'adéquation de l'analyse factorielle a été préalablement vérifiée à l'aide de l'indice KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) et du test de sphéricité de Bartlett, conformément aux recommandations méthodologiques pour les données multivariées [287].

L'analyse de la matrice de corrélation (Tau-b de Kendall) a révélé une association significative entre l'aluminium et plusieurs paramètres, notamment les bicarbonates et la minéralisation globale. Une corrélation positive avec les bicarbonates (HCO_3^-) suggère un rôle du système carbonaté dans la stabilisation de l'aluminium en solution. Des études antérieures ont montré que l'aluminium peut former des complexes solubles avec les ions bicarbonates, limitant ainsi sa précipitation sous forme d'hydroxyde ($\text{Al}(\text{OH})_3$) [288,289].

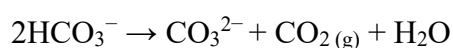
L'association observée avec la minéralisation totale ainsi qu'avec des ions contribuant aux teneurs (Ca^{2+} , Mg^{2+}) indique que les eaux riches en sels dissous tendent à présenter des concentrations plus élevées en aluminium. Ce phénomène peut être attribué à la dissolution de minéraux alumino-silicatés comme la kaolinite ou la gibbsite, ou encore de minéraux alumino-fluorés comme la fluorapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$), en présence de conditions géochimiques favorables [290].

Une corrélation significative entre les fluorures et l'aluminium soutient également cette hypothèse. En effet, la présence concomitante de ces deux éléments dans les eaux souterraines est fréquemment liée à la dissolution de minéraux naturels contenant du fluor et de l'aluminium, ce qui reflète une origine géogénique [291]. Cependant, dans les eaux dures, la formation de complexes fluorés solubles (ex. : AlF_6^{3-}) peut maintenir l'aluminium en solution, même à pH basique [292].

A l'inverse, aucune corrélation statistiquement significative n'a été observée entre le pH et l'aluminium, ce qui pourrait s'expliquer par la stabilité du pH autour de 7,4 dans les échantillons étudiés. La littérature indique que l'aluminium est principalement soluble à pH acide et précipite au-delà de pH 6,5–7, mais l'étroite plage de pH enregistrée limite cet effet dans le travail actuel [293].

De plus, l'absence de corrélation entre l'aluminium et les chlorures indique une origine essentiellement géologique, plutôt qu'anthropique, pour l'aluminium détecté. Cela confirme les observations antérieures basées sur la composition ionique.

Des modèles de régression linéaire ont été appliqués pour quantifier les effets des paramètres physico-chimiques sur les concentrations d'aluminium avant et après ébullition. Une relation positive significative a été établie entre les bicarbonates et l'aluminium total ($\beta = 0,415$; $p = 0,001$), confirmant leur rôle stabilisateur. Cependant, après ébullition, une relation inverse a été observée ($p = 0,002$), probablement due à la décomposition thermique des bicarbonates qui, en libérant du CO_2 , provoque une acidification locale et une résolution du précipité d'hydroxyde d'aluminium ($\text{Al}(\text{OH})_3$) [294].



En parallèle, l'effet significatif des fluorures sur la diminution de l'aluminium après ébullition ($p = 0,007$; $\beta = -0,331$) peut être expliqué par la formation de complexes fluorés insolubles ou leur précipitation à haute température [295].

- **Interprétation de l'ACP**

L'ACP a permis de structurer les échantillons selon leur composition chimique. L'axe 1 (Dim. 1 : 39,22 % de la variance) sépare les eaux fortement minéralisées et riches en aluminium (ex.: Mozaya, Guerbez) des eaux peu minéralisées, qui présentent des niveaux élevés d'aluminium dissous uniquement après ébullition. Ces dernières sont majoritairement issues de l'eau du robinet alimentée par des barrages ou des mélanges barrage-forages (Annaba, El Bouni, El Hadjar et Sidi-Amar).

Le cercle de corrélation montre que les flèches représentant l'aluminium après ébullition ($\text{Al}_{1,1}$, $\text{Al}_{1,2}$, $\text{Al}_{1,3}$) sont opposées à celles du calcium, des bicarbonates et des résidus secs, indiquant une relation antagoniste.

Sur Dim. 2, la distinction porte sur la réponse à l'ébullition : les échantillons les plus touchés par la solubilisation de l'aluminium (notamment les eaux de barrage) s'opposent à ceux riches en minéraux stabilisateurs.

Les résultats indiquent que les eaux de barrage et les mélanges (BF) sont les plus sensibles au relargage d'aluminium après chauffage. Ceci pourrait être lié à l'utilisation de sulfate

d'aluminium ($Al_2(SO_4)_3$) comme coagulant lors du traitement de l'eau. En cas de surdosage ou de filtration incomplète, des résidus de coagulant peuvent persister et se redissoudre sous l'effet de la chaleur [296].

L'ébullition induit également une décomposition des bicarbonates, libérant du CO_2 , ce qui abaisse localement le pH et favorise la dissolution de l'aluminium précipité [289]. L'absence de minéraux complexants, comme le calcium ou les carbonates, dans certaines eaux du robinet accentue ce phénomène

- **Rôle de la troisième composante (Dim. 3)**

L'analyse de Dim. 3 (10,41 % de la variance) a mis en évidence une forte corrélation entre l'aluminium et les fluorures. Les eaux contenant plus de fluorures, notamment les eaux minérales et de fourrage, semblent moins affectées par le relargage post-ébullition, en raison de la formation de complexes fluorés peu solubles.

- **Classification hiérarchique (ACH) et Constellation Plot**

L'ACH a confirmé les regroupements observés par l'ACP. Le dendrogramme distingue trois grands groupes :

- **Eaux minérales et de source (M, S)** : les plus stables vis-à-vis du relargage d'aluminium ;
- **Eaux de barrage (B) et mélangées (BF)** : les plus susceptibles au relargage post-ébullition ;
- **Eaux de forage (F)** : intermédiaires, avec une variabilité notable.

Le Constellation Plot confirme cette classification, montrant un regroupement clair des échantillons B et BF, et une plus grande dispersion des eaux de forages et de source.

4. Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'importance du relargage de l'aluminium à partir de casseroles en aluminium lors de l'ébullition de l'eau destinée à la préparation des biberons, ainsi que les facteurs physico-chimiques influençant ce phénomène.

Les résultats montrent que l'ébullition d'une eau, même pendant une durée minimale d'une minute, induit un relargage significatif d'aluminium, atteignant des concentrations pouvant dépasser 1800 µg/L, soit largement au-dessus des seuils recommandés pour l'eau potable. Ce relargage est fortement influencé par le type de casserole utilisée, sa provenance, son état de surface, ainsi que la nature chimique de l'eau.

CONCLUSION

L'aluminium, bien qu'exogène et sans rôle biologique avéré, constitue un contaminant préoccupant pour le nourrisson, du fait de sa légèreté potentielle et de l'immaturité physiologique caractéristique de cette population (perméabilité intestinale accumulée, immaturité de la fonction rénale et de la barrière hémato-encéphalique). Cette thèse a permis de dresser un état des lieux approfondi de l'exposition des nourrissons à l'aluminium dans la wilaya d'Annaba, en intégrant une approche multidimensionnelle alliant analyses chimiques, enquête épidémiologique et étude de pratiques domestiques.

L'analyse de 61 échantillons de laits infantiles commercialisés en Algérie a mis en évidence la présence généralisée d'aluminium, avec des teneurs moyennes bien supérieures à celles mesurées dans le lait maternel (facteur 10 à 20). Les formules à base de soja et certains laits thérapeutiques ont présenté les concentrations les plus élevées (jusqu'à 7 $\mu\text{g/g}$). Parallèlement, l'étude de 66 échantillons d'eaux destinés à la reconstitution des biberons a révélé que 25 % des eaux minérales et 16,7 % des eaux de source dépassaient la limite réglementaire de 200 $\mu\text{g/L}$. Bien que l'eau du robinet présente, dans l'ensemble, une meilleure conformité aux normes en vigueur, l'ébullition entraîne dans certains cas une augmentation marquée de sa teneur en aluminium, avec des niveaux dépassant largement les seuils de sécurité sanitaire.

L'évaluation des Doses Hebdomadaires Ingérées (DHI) a révélé que, bien que la plupart des nourrissons restent en dessous de la Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) de l'EFSA (1 mg/kg/semaine), certaines situations d'exposition cumulative (eau + lait infantile + relargage des casseroles) conduisent à des dépassements inquiétants.

L'évaluation du relargage de l'aluminium à partir de casseroles en aluminium non revêtues a révélé une augmentation marquée des concentrations post-ébullition, atteignant jusqu'à 2867 $\mu\text{g/L}$, soit une multiplication par plus de 20 par rapport à l'eau initiale. Cette pratique, rapportée chez près de 58 % des mères, constitue un facteur d'exposition sous-estimé. De plus, la reconstitution des laits avec des eaux déjà riches en aluminium ou non conformes accentue ce risque.

L'enquête auprès de 874 mères a permis de contextualiser ces données, en révélant une forte prévalence de l'alimentation artificielle exclusive (48,3 %) et une utilisation massive de l'eau embouteillée (89,7 %), guidée par des motifs essentiellement pratiques et subjectifs, souvent au détriment de la qualité sanitaire. Les pratiques d'hygiène alimentaire, notamment le choix de l'eau et du matériel de chauffage, sont rarement fondées sur des recommandations scientifiques.

De plus, l'usage des ustensiles de chauffage en aluminium est fréquent (57,66 %), augmentant ainsi l'exposition potentielle des nourrissons.

Enfin, l'approche chimiométrique et l'analyse statistique des interactions entre les paramètres physico-chimiques de l'eau et le relargage de l'aluminium ont confirmé le rôle atténuateur des bicarbonates et fluorures, et mis en évidence une plus grande réactivité des eaux de surface vis-à-vis du matériau aluminium.

Ces constats appellent à une prise de conscience urgente des enjeux sanitaires liés à l'exposition précoce à l'aluminium, à travers une meilleure information des parents, un encadrement réglementaire renforcé, et une promotion active de l'allaitement maternel.

En mettant en évidence les principales sources d'exposition à l'aluminium ainsi que les pratiques domestiques à risque, cette étude fournit des données nouvelles susceptibles d'éclairer les politiques de santé publique et d'orienter les recommandations en nutrition infantile. Elle met en exergue la nécessité d'un contrôle strict des contaminants dans l'alimentation des nourrissons et ouvre des perspectives de recherche sur les effets à long terme d'une exposition précoce à l'aluminium.

❖ Note éthique importante

L'identification des marques commerciales mentionnées dans cette étude vise uniquement à illustrer la variabilité des teneurs en aluminium observées entre les produits analysés.

Aucune intention de promotion ou de dénigrement n'est associée à cette démarche, qui s'inscrit dans un cadre purement scientifique et informatif.

**RECOMMENDATIONS ET
PERSPECTIVES**

Recommandations

❖ Promotion et protection de l'allaitement maternel

- Renforcer l'accompagnement postnatal pour encourager l'allaitement exclusif.
- Améliorer la formation des professionnels de santé aux bienfaits de l'allaitement et à la prévention du sevrage précoce.
- Encadrer strictement la commercialisation des substituts du lait maternel, notamment en Algérie.
- Mettre en place des politiques favorables à l'allaitement en milieu professionnel (congé, espaces d'allaitement).
- Sensibiliser les mères césariées ou ayant accouché prématurément aux solutions adaptées.

❖ Réduction de l'exposition à l'aluminium dans l'eau potable

- Fixer une limite maximale d'aluminium plus stricte dans l'eau destinée aux nourrissons ($< 100 \mu\text{g/L}$).
- Promouvoir un étiquetage clair des eaux en bouteille, mentionnant leur compatibilité avec l'alimentation infantile.
- Encourager les stations de traitement à utiliser des coagulants alternatifs moins riches en aluminium (ex : chlorures de polyaluminium).
- Optimiser les paramètres de traitement (pH, alcalinité, température) pour limiter la solubilité de l'aluminium.
- Surveiller systématiquement les eaux mises en bouteille et l'eau du robinet destinées aux populations vulnérables.

❖ Réduction de l'exposition à l'aluminium dans les formules Infantiles

- Mettre en place une norme réglementaire nationale sur la teneur maximale en aluminium dans les PPN.
- Imposer un étiquetage obligatoire de la teneur en aluminium sur les boîtes de lait infantile.
- Renforcer les contrôles des matières premières et procédés industriels (émulsifiants, additifs).
- Encourager la recherche sur des formulations alternatives à faible contamination métallique.

Perspectives

Pour approfondir les résultats de cette étude, plusieurs pistes de recherche complémentaires sont suggérées :

- ❖ **Evaluer la charge corporelle réelle en aluminium** chez les nourrissons par l'analyse biologique (urines, cheveux), en comparant les enfants allaités et ceux nourris au biberon.
- ❖ **Etudier les cinétiques de relargage** de l'aluminium selon la durée et la température du chauffage, et selon différents matériaux (inox, verre, revêtements antiadhésifs).
- ❖ **Explorer plus finement les causes du sevrage précoce**, en lien avec les conditions socio-économiques, les croyances, et le rôle du personnel de santé dans l'orientation des pratiques.
- ❖ **Valider et élargir la méthode colorimétrique développée**, afin de l'appliquer à d'autres matrices alimentaires et à un usage de routine en laboratoire de santé publique.
- ❖ **Analyser l'impact cumulatif multi-sources** (lait + eau + ustensiles) dans une modélisation plus complète de l'exposition hebdomadaire.

La poursuite de ces investigations permettrait d'affiner l'évaluation des risques et de mieux orienter les recommandations qui visent à protéger la santé des nourrissons contre une exposition excessive à l'aluminium.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Amaral JS, Mafra I, Pissard A, Fernández Pierna JA, Baeten V. Milk and milk products. *Foodintegrity Handbook*; Morin, J-F, Lees, M, Eds. 2018;3-26.
- [2]. Appleton J, Russell CG, Fowler C, Jansen E, Burnett AJ, Rossiter C, Denney-Wilson E. Informing Infant Nutrition: Timing of Infant Formula Advice, Infant Formula Choice and Preparation in the First 6 Months of Life. *Journal of Nutrition Education and Behavior*. 1 oct 2022;54(10):908-15.
- [3]. Wilkinson TA, Scott EK, Carroll AE. Mixed Message on Formula Mixing. *Pediatrics*. 1 juin 2019;143(6):e20182525.
- [4]. Green Corkins K, Shurley T. What's in the Bottle? A Review of Infant Formulas. *Nut in Clin Prac*. déc 2016;31(6):723-9.
- [5]. Ikem A, Nwankwoala A, Oduyungbo S, Nyavor K, Egiebor N. Levels of 26 elements in infant formula from USA, UK, and Nigeria by microwave digestion and ICP–OES. *Food Chemistry*. 1 juin 2002;77(4):439-47.
- [6]. Goullé JP, Saussereau E, Lacroix C, Guerbet M. Chapitre 24 - Métaux. In: Kintz P, éditeur. *Traité De Toxicologie Médico-judiciaire (Deuxième Édition)* [Internet]. Paris: Elsevier Masson; 2012 [cité 20 août 2024]. p. 733-67. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9782294715617000248>
- [7]. De Paiva EL, Milani RF, Morgano MA, Arisseto-Bragotto AP. Aluminum in infant formulas commercialized in Brazil: Occurrence and exposure assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*. sept 2019;82:103230.
- [8]. Bohrer D, Oliveira SMR, Garcia SC, Nascimento PC, Carvalho LM. Aluminum loading in preterm neonates revisited. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*. août 2010;51(2):237-41.
- [9]. Baxter MJ, Burrell JA, Crews H, Massey RC. Aluminium levels in milk and infant formulae. *Food Additives and Contaminants*. sept 1991;8(5):653-60.
- [10]. Dabeka R, Fouquet A, Belisle S, Turcotte S. Lead, cadmium and aluminum in Canadian infant formulae, oral electrolytes and glucose solutions. *Food Additives and Contaminants*. 2011;28(6):744-53.
- [11]. Fewtrell MS, Edmonds CJ, Isaacs E, Bishop NJ, Lucas A. Aluminium exposure from parenteral nutrition in preterm infants and later health outcomes during childhood and adolescence. *Proceedings of the Nutrition Society*. 2011;70(3):299-304.
- [12]. Fernandez-Lorenzo JR, Cocho JA, Rey-Goldar ML, Couce M, Fraga JM. Aluminum contents of human milk, cow's milk, and infant formulas. *Journal of pediatric gastroenterology and nutrition*. 1999;28(3):270-5.
- [13]. Grangeot-Keros L. Les adjuvants aluminiques : le point en 2016. *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*. août 2016;29(4):215-35.

- [14]. Greger JL, Sutherland JE, Yokel R. Aluminum Exposure and Metabolism. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*. 1 janv 1997;34(5):439-74.
- [15]. Bonfiglio R, Scimeca M, Mauriello A. The impact of aluminum exposure on human health. *Arch Toxicol*. 1 nov 2023;97(11):2997-8.
- [16]. Bahloul N, Ghozzi H, Mahmoud LB, Ketata W, M'saad S, Yengui I. Évaluation du risque toxicologique de l'aluminium présent dans le lait infantile à court terme chez la souris Swiss. 2018 [cité 25 févr 2025]; Disponible sur: <https://www.academia.edu/download/110234485/j.reval.2018.02.17320240109-1-j29qys.pdf>
- [17]. Kalt A. Vaccins à l'aluminium: un débat loin d'être tranché. 2015 [cité 26 févr 2025]; Disponible sur: <http://environnement-lanconnais.asso.fr/spip.php?article809>
- [18]. Mold M, Umar D, King A, Exley C. Aluminium in brain tissue in autism. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. mars 2018;46:76-82.
- [19]. Exley C. Pourquoi la propagande industrielle et l'ingérence politique ne peuvent dissimuler le rôle indéniable joué par l'exposition de l'être humain à l'aluminium sur les maladies neurodégénératives, notamment la maladie d'Alzheimer.
- [20]. Alasfar RH, Isaifan RJ. Aluminum environmental pollution: the silent killer. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021;28(33):44587-97.
- [21]. Boué G, Cummins E, Guillou S, Antignac JP, Le Bizec B, Membré JM. Public health risks and benefits associated with breast milk and infant formula consumption. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018;58(1):126-45.
- [22]. AI-Ashmawy MAM. Prevalence and Public Health Significance of Aluminum Residues in Milk and Some Dairy Products. *Journal of Food Science*. 2011;76(3):T73-6.
- [23]. Ostermann F. 1501.01 History and Present State of Aluminium Production.
- [24]. Runge JM. *The Metallurgy of Anodizing Aluminum* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2018 [cité 20 nov 2024]. Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-72177-4>
- [25]. Barjot D. L'aluminium Aux XXe Et XXie Siècles. *Étude D'économie Industrielle. Entreprises et Histoire*. 2016;(82):143.
- [26]. Mazzolani F. *Aluminium Alloy Structures*, Second Edition. CRC Press; 1994. 760 p.
- [27]. Farndon J. *Aluminum*. Marshall Cavendish; 2001. 42 p.
- [28]. Fiches toxicologiques - Publications et outils - INRS [Internet]. [cité 22 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox.html>

- [29]. Stojanovic B, Bukvic M, Epler I. Application of Aluminum and Aluminum Alloys in Engineering. *Applied Engineering Letters*. 2018;3(2):52-62.
- [30]. Krewski D, Yokel RA, Nieboer E, Borchelt D, Cohen J, Harry J, Kacew S, Lindsay J, Mahfouz AM, Rondeau V. Human Health Risk Assessment for Aluminium, Aluminium Oxide, and Aluminium Hydroxide. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 16 nov 2007;10(sup1):1-269.
- [31]. Benhamimid H, Boudaoud C, Boussekine R, Bouziane M, Kheroufi A, Ksier D, Makhoulouf FZ, Mansouri S, Mekaoussi I, Meradji M. Impact de l'aluminium sur la santé humaine. 2022 [cité 24 nov 2024]; Disponible sur: <https://fac.umc.edu.dz/inataa/revue/files/ajnfs0201001.pdf>
- [32]. Poëy J, Philibert C. Toxicité des métaux. *Revue Française des Laboratoires*. 1 mai 2000;2000(323):35-43.
- [33]. Aluminium. Du métal de luxe au métal de masse (XIXe-XXIe siècle) - Dominique Barjot, Marco Bertilorenzi [Internet]. [cité 22 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.decitre.fr/livres/aluminium-9782840509653.html>
- [34]. Kutai VE, Tsygankov VY. The physicochemical properties and distribution of aluminum in the environment, the effect on living organisms, the reduction of its toxic effect. *Medical academic journal*. 2021;21(2):25-36.
- [35]. Igbokwe IO, Igwenagu E, Igbokwe NA. Aluminium toxicosis: a review of toxic actions and effects. *Interdisciplinary Toxicology*. 1 oct 2019;12(2):45-70.
- [36]. Exley C. Human exposure to aluminium. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2013;15(10):1807-16.
- [37]. Exley C, Begum A, Woolley MP, Bloor RN. Aluminum in Tobacco and Cannabis and Smoking-Related Disease. *The American Journal of Medicine*. mars 2006;119(3): 276.e9-276.e11.
- [38]. Authority (EFSA) EFS. Safety of aluminium from dietary intake - Scientific Opinion of the Panel on Food Additives, Flavourings, Processing Aids and Food Contact Materials (AFC). *EFSA Journal*. 2008;6(7):754.
- [39]. Exley C. *Aluminium and Alzheimer's Disease: The Science that Describes the Link*. Elsevier; 2001. 453 p.
- [40]. Ricoux C, Gastowtt B. Evaluation des risques sanitaires liés à l'exposition de forts consommateurs de produits de la pêche de rivière contaminés par des toxiques de l'environnement [Internet]. Institut de veille sanitaire; 2005 [cité 14 déc 2024]. Disponible sur: https://www.academia.edu/download/98399286/rapport_risques_peche.pdf

- [41]. mondiale de la Santé O. Directives de qualité pour l'eau de boisson: 4e éd. intégrant le premier additif. 2017 [cité 14 déc 2024]; Disponible sur: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258887/9789242549959-fre.pdf>
- [42]. Hardisson A, Revert C, González-Weller D, Gutiérrez A, Paz S, Rubio C. Aluminium Exposure Through the Diet. *HSOA Journal of Food Science and Nutrition*. 10 juill 2017;3:1-10.
- [43]. Daouk SE. L'exposition à l'aluminium dans la population Libanaise et analyse des déterminants notamment alimentaires.
- [44]. Bryliński Ł, Kostelecka K, Woliński F, Duda P, Góra J, Granat M, Flieger J, Teresiński G, Buszewicz G, Sitarz R, Baj J. Aluminium in the Human Brain: Routes of Penetration, Toxicity, and Resulting Complications. *International Journal of Molecular Sciences*. janv 2023;24(8):7228.
- [45]. Müller M, Anke M, Illing-Günther H. Aluminium in foodstuffs. *Food Chemistry*. 1 avr 1998;61(4):419-28.
- [46]. Ranau R, Oehlenschläger J, Steinhart H. Aluminium levels of fish fillets baked and grilled in aluminium foil. *Food Chemistry*. 1 avr 2001;73(1):1-6.
- [47]. Authority (EFSA) EFS. Dietary exposure to aluminium-containing food additives. EFSA Supporting Publications. 2013;10(4):411E.
- [48]. Benford DJ, Thatcher N, Mason D. Aluminium from all sources, including food additives and contaminants (addendum). First draft. Safety evaluation of certain food additives and contaminants WHO Food additives. 2007;58:119.
- [49]. Réglementation | Ministère du Commerce Algérie [Internet]. [cité 12 déc 2024]. Disponible sur: <https://www.commerce.gov.dz/fr/reglementation/decret-executif-n-deg-12-214>
- [50]. Greger JL. Dietary and Other Sources of Aluminium Intake. In: Chadwick DJ, Whelan J, éditeurs. *Novartis Foundation Symposia* [Internet]. 1^{re} éd. Wiley; 2007 [cité 13 juin 2024]. p. 26-49. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470514306.ch3>
- [51]. Niu Q. Overview of the Relationship Between Aluminum Exposure and Health of Human Being. In: Niu Q, éditeur. *Neurotoxicity of Aluminum* [Internet]. Singapore: Springer Singapore; 2018 [cité 12 déc 2024]. p. 1-31. (*Advances in Experimental Medicine and Biology*; vol. 1091). Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-1370-7_1

- [52]. Additives F. Evaluation of certain food additives and contaminants. 2013 [cité 12 déc 2024]; Disponible sur: <https://search.proquest.com/openview/7912370f087fa5ce9a6d88a14663d962/1?pq-origsite=gscholar&cbl=105620>
- [53]. Hachez-Leroy F. L'aluminium alimentaire. Cahiers d'histoire de l'aluminium. 2016;5657(1):87-9.
- [54]. Zubaidy EAHA, Mohammad FathiaS, Bassioni G. Effect of pH, Salinity and Temperature on Aluminum Cookware Leaching During Food Preparation. International Journal of Electrochemical Science. 1 déc 2011;6(12):6424-41.
- [55]. Food C of EC of E on PM for, Products P. Metals and alloys used in food contact materials and articles: a practical guide for manufacturers and regulators. European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare (EDQM); 2013.
- [56]. Europe C. Council of Europe's policy statements concerning materials and articles intended to come into contact with foodstuffs. Policy Statement concerning materials and alloys. Technical Document Guidelines on metals and a/loys used as food contact materials. 2001;9(2001):67.
- [57]. Zeager M, Woolf AD, Goldman RH. Wide variation in reference values for aluminum levels in children. Pediatrics. 2012;129(1):e142-7.
- [58]. Masson JD, Crépeaux G, Authier FJ, Exley C, Gherardi RK. Adjuvants aluminiques des vaccins : analyse critique des études toxicocinétiques de référence. Annales Pharmaceutiques Françaises. juill 2017;75(4):245-56.
- [59]. Siemund I, Zimerson E, Hindsén M, Bruze M. Establishing aluminium contact allergy. Contact Dermatitis. sept 2012;67(3):162-70.
- [60]. Canada S. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada [Internet]. 2004 [cité 30 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/qualite-eau/eau-potable/recommandations-qualite-eau-potable-canada.html>
- [61]. Tietz T, Lenzner A, Kolbaum AE, Zellmer S, Riebeling C, Gürtler R, Jung C, Kappenstein O, Tentschert J, Giulbudagian M, Merkel S, Pirow R, Lindtner O, Tralau T, Schäfer B, Laux P, Greiner M, Lampen A, Luch A, Wittkowski R, Hensel A. Aggregated aluminium exposure: risk assessment for the general population. Arch Toxicol. 1 déc 2019;93(12):3503-21.
- [62]. Ivanovski I, Ivanovski A, Nikolić D, Ivanovski P. Aluminium in brain tissue in autism. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. janv 2019;51:138-40.

- [63]. Mujika JI, Rezabal E, Mercero JM, Ruipérez F, Costa D, Ugalde JM, Lopez X. Aluminium in biological environments: a computational approach. *Computational and structural biotechnology journal*. 2014;9(15):e201403002.
- [64]. Mouro VGS, Menezes TP, Lima GDA, Domingues RR, Souza ACF, Oliveira JA, Matta SLP, Machado-Neves M. How Bad Is Aluminum Exposure to Reproductive Parameters in Rats? *Biol Trace Elem Res*. juin 2018;183(2):314-24.
- [65]. Awadh SM, Yaseen ZM, Al-Suwaiyan MS. The role of environmental trace element toxicants on autism: A medical biogeochemistry perspective. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1 févr 2023;251:114561.
- [66]. Agence Française De Sécurité Sanitaire Des Produits De Santé, et al. Évaluation du risque lié à l'utilisation de l'aluminium dans les produits cosmétiques. Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé, Saint-Denis. Rapp, 2011.
- [67]. Serreau R, Rigourd V, Pommeret B. État des connaissances sur les contaminants dans le lait maternel. *Rev med perinat*. sept 2017;9(3):146-56.
- [68]. Exley C. The toxicity of aluminium in humans. *Morphologie*. juin 2016;100(329):51-5.
- [69]. Gourier-Fréry C, Fréry N, Berr C, Cordier S, Garnier R, Isnard H. Aluminium. Quels risques pour la santé? Synthèse des études épidémiologiques. Volet épidémiologique de l'expertise collective INVS-Afssa-Afssaps Institut de Veille Sanitaire. 2003;
- [70]. Santé AF de SS des P de. Évaluation du risque lié à l'utilisation de l'aluminium dans les produits cosmétiques. Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé, Saint-Denis Rapp. 2011;
- [71]. Kearns GL, Abdel-Rahman SM, Alander SW, Blowey DL, Leeder JS, Kauffman RE. Developmental Pharmacology — Drug Disposition, Action, and Therapy in Infants and Children. Wood AJJ, éditeur. *N Engl J Med*. 18 sept 2003;349(12):1157-67.
- [72]. Landrigan PJ, Kimmel CA, Correa A, Eskenazi B. Children's health and the environment: public health issues and challenges for risk assessment. *Environ Health Perspect*. févr 2004;112(2):257-65.
- [73]. Renwick AG, Dorne JL, Walton K. An analysis of the need for an additional uncertainty factor for infants and children. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2000;31(3):286-96.
- [74]. EFSA Scientific Committee, Hardy A, Benford D, Halldorsson T, Jeger MJ, Knutsen HK, More S, Naegeli H, Noteborn H, Ockleford C, Ricci A, Rychen G, Schlatter JR, Silano V, Solecki R, Turck D, Bresson J, Dusemund B, Gundert-Remy U, Kersting M, Lambré C, Penninks A, Tritscher A, Waalkens-Berendsen I, Woutersen R, Arcella D, Court Marques D, Dorne J, Kass GE, Mortensen A. Guidance on the risk assessment of

- substances present in food intended for infants below 16 weeks of age. EFS2 [Internet]. mai 2017 [cité 22 déc 2024];15(5). Disponible sur: <https://data.europa.eu/doi/10.2903/j.efsa.2017.4849>
- [75]. Haut Conseil de la santé publique. Rapport sur l'allaitement maternel. 12 juin 2024.
- [76]. Exley C, Mold MJ. The binding, transport and fate of aluminium in biological cells. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. avr 2015;30:90-5.
- [77]. Exley C, Derek Birchall J. The cellular toxicity of aluminium. *Journal of Theoretical Biology*. nov 1992;159(1):83-98.
- [78]. Exley C, House ER. Aluminium in the human brain. *Monatsh Chem*. avr 2011;142(4):357-63.
- [79]. Duhamel, J. F., Laurans, M., Arion, A., et al. Contaminants et développement du cerveau. *Journal de pédiatrie et de puériculture*, 1997, vol. 10, no 5, p. 277-280.
- [80]. Morris G, Puri BK, Frye RE. The putative role of environmental aluminium in the development of chronic neuropathology in adults and children. How strong is the evidence and what could be the mechanisms involved? *Metab Brain Dis*. oct 2017;32(5):1335-55.
- [81]. Exley C. The pro-oxidant activity of aluminum. *Free Radical Biology and Medicine*. 2004;36(3):380-7.
- [82]. Baj J, Flieger W, Flieger M, Forma A, Sitarz E, Skórzyńska-Dziduszko K, Grochowski C, Maciejewski R, Karakuła-Juchnowicz H. Autism spectrum disorder: Trace elements imbalances and the pathogenesis and severity of autistic symptoms. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 1 oct 2021;129:117-32.
- [83]. Bjørklund G, Skalny AV, Rahman MdM, Dadar M, Yassa HA, Aaseth J, Chirumbolo S, Skalnaya MG, Tinkov AA. Toxic metal(loid)-based pollutants and their possible role in autism spectrum disorder. *Environmental Research*. oct 2018;166:234-50.
- [84]. Tomljenovic L, Shaw CA. Do aluminum vaccine adjuvants contribute to the rising prevalence of autism? *Journal of Inorganic Biochemistry*. nov 2011;105(11):1489-99.
- [85]. Abd Wahil MS, Ja'afar MH, Md Isa Z. Urinary aluminium and its association with autism spectrum disorder in urban preschool children in Malaysia. *PeerJ*. 12 mai 2023;11:e15132.
- [86]. Sulaiman R, Wang M, Ren X. Exposure to Aluminum, Cadmium, and Mercury and Autism Spectrum Disorder in Children: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Chem Res Toxicol*. 16 nov 2020;33(11):2699-718.

- [87]. Amadi CN, Orish CN, Frazzoli C, Orisakwe OE. Association of autism with toxic metals: A systematic review of case-control studies. *Pharmacol Biochem Behav.* janv 2022;212:173313.
- [88]. Shiani A, Sharafi K, Omer AK, Kiani A, Karamimatin B, Massahi T, Ebrahimzadeh G. A systematic literature review on the association between exposures to toxic elements and an autism spectrum disorder. *Sci Total Environ.* 20 janv 2023;857(Pt 2):159246.
- [89]. Exley C, Korchazhkina O, Job D, Strekopytov S, Polwart A, Crome P. Non-invasive therapy to reduce the body burden of aluminium in Alzheimer's disease. *Journal of Alzheimer's Disease.* 2006;10(1):17-24.
- [90]. Rondeau V, Commenges D, Jacqmin-Gadda H, Dartigues JF. Relation between aluminum concentrations in drinking water and Alzheimer's disease: an 8-year follow-up study. *American journal of epidemiology.* 2000;152(1):59-66.
- [91]. Exley C, Vickers T. Elevated brain aluminium and early onset Alzheimer's disease in an individual occupationally exposed to aluminium: a case report. *J Med Case Reports.* déc 2014;8(1):41.
- [92]. Exley C, Mold MJ. Aluminium in human brain tissue: how much is too much? *J Biol Inorg Chem.* déc 2019;24(8):1279-82.
- [93]. Capriotti T, Terzakis K. Parkinson disease. *Home healthcare now.* 2016;34(6):300-7.
- [94]. Tomljenovic L. Les adjuvants aluminiques dans les vaccins : sont-ils sans danger? *Current Medicinal Chemistry.* 2011;
- [95]. Russ TC, Killin LOJ, Hannah J, Batty GD, Deary IJ, Starr JM. Aluminium and fluoride in drinking water in relation to later dementia risk. *Br J Psychiatry.* janv 2020;216(1):29-34.
- [96]. Shaw CA, Petrik MS. Les injections d'hydroxyde d'aluminium entraînent des déficiences motrices et une dégénérescence des neurones moteurs.
- [97]. Foster HD. L'aluminium en cause. 2005 [cité 15 févr 2025]; Disponible sur: http://www.22colombo.magix.net/public/index_htm_files/alzheimer.pdf
- [98]. Exley C, Charles LM, Barr L, Martin C, Polwart A, Darbre PD. Aluminium in human breast tissue. *Journal of Inorganic Biochemistry.* 1 sept 2007;101(9):1344-6.
- [99]. Darbre PD. Aluminium, antiperspirants and breast cancer. *Journal of Inorganic Biochemistry.* sept 2005;99(9):1912-9.
- [100]. Chappard D, Bizot P, Mabilieu G, Hubert L. Aluminum and bone: Review of new clinical circumstances associated with Al³⁺ deposition in the calcified matrix of bone. *Morphologie.* 1 juin 2016;100(329):95-105.

- [101]. Lerner A. Aluminum as an adjuvant in Crohn's disease induction. *Lupus*. 1 févr 2012;21(2):231-8.
- [102]. Pineton de Chambrun G, Body-Malapel M, Frey-Wagner I, Djouina M, Deknuydt F, Atrott K, Esquerre N, Altare F, Neut C, Arrieta MC, Kanneganti TD, Rogler G, Colombel JF, Cortot A, Desreumaux P, Vignal C. Aluminum enhances inflammation and decreases mucosal healing in experimental colitis in mice. *Mucosal Immunol*. mai 2014;7(3):589-601.
- [103]. Moussaron A, Alexandre J, Chenard MP, Mathelin C, Reix N. Correlation between daily life aluminium exposure and breast cancer risk: A systematic review. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 1 sept 2023;79:127247.
- [104]. Manual Of Methods Of Analysis Of Foods Water ; Food Safety and Standards authority of India Ministry of Health And Family welfare Government of India New Delhi 2016.
- [105]. Rodier J, Legube B, Merlet N. *L'analyse de l'eau*-10e éd. Dunod; 2016.
- [106]. Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation : spectrométrie d'absorption atomique. Axe « Génie des Procédés », Centre SPIN, École des Mines de Saint-Étienne. 2002. In.
- [107]. Frankowski M, Zioła-Frankowska A, Kurzyca I, Novotný K, Vaculovič T, Kanický V, Siepak M, Siepak J. Determination of aluminium in groundwater samples by GF-AAS, ICP-AES, ICP-MS and modelling of inorganic aluminium complexes. *Environ Monit Assess*. 1 nov 2011;182(1):71-84.
- [108]. Givelet L, Amlund H, Loeschner K, Sloth JJ. Aluminium Determination in Foodstuffs by ICP-MS: Influence of Microwave Digestion Parameters on the Recovery. *Food Anal Methods*. 1 juill 2024;17(7):1038-45.
- [109]. Bridgewater LL, Baird RB, Eaton AD, Rice EW, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, éditeurs. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd edition. Washington, DC: American Public Health Association; 2017. 1 p.
- [110]. Manuel pratique d'analyse de l'eau [Internet]. [cité 14 déc 2024]. Disponible sur: <https://123dok.net/document/zkw1gmd1-manuel-pratique-d-analyse-de-l-eau.html>
- [111]. Hejri O, Bzorgzadeh E, Soleimani M, Mazaheri R. Determination of trace aluminum with eriochrome cyanine R after cloud point extraction. *World Applied Sciences Journals*. 2011;15:218-22.
- [112]. Leng F, Jing Y, Wei Q, Wang Y, Lv Y, Wang X, Zhu X. Spectrophotometric method for determination of trace aluminum with application of Alizarin Red S.

- [113]. Santos EJ, Fantin EB, Paixão RE, Herrmann AB, Sturgeon RE. Spectrophotometric determination of aluminium in hemodialysis water. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2015;26:2384-8.
- [114]. ISO 12020:1997(fr), Qualité de l'eau — Dosage de l'aluminium — Méthodes par spectrométrie d'absorption atomique [Internet]. [cité 14 déc 2024]. Disponible sur: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12020:ed-1:v1:fr>
- [115]. Bagryantseva OV, Shatrov GN, Khotimchenko SA, Bessonov VV, Arnautov OV. Aluminium: food-related health risk assessment of the consumers. *Health Risk Analysis*. 2016;(1):49-57.
- [116]. European Commission. Directorate General for Health and Food Safety. Final opinion on tolerable intake of aluminium with regards to adapting the migration limits for aluminium in toys. [Internet]. LU: Publications Office; 2017 [cité 12 sept 2024]. Disponible sur: <https://data.europa.eu/doi/10.2875/264211>
- [117]. Klein CJ. Nutrient Requirements For Preterm Infant Formulas^{2,3}. *The Journal of Nutrition*. 1 juin 2002;132(6):1395S-1577S.
- [118]. Infant Feeding in the 20th Century: Formula and Beikost. *The Journal of Nutrition*. 1 févr 2001;131(2):409S-420S.
- [119]. Lieffers C. “They Perished in the Cause of Science”: Justus von Liebig’s Food for Infants. *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*. 1 janv 2024;79(1):1-22.
- [120]. Happe RP, Gambelli L. Infant formula. In: *Specialty Oils and Fats in Food and Nutrition* [Internet]. Elsevier; 2015 [cité 18 juill 2022]. p. 285-315. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782423768000120>
- [121]. République Algérienne Démocratique et Populaire. Arrêté interministériel du Aouel Rabie Ethani 1433 correspondant au 23 février 2012 portant adoption du règlement technique algérien fixant les spécifications, les conditions et les modalités de présentation des préparations destinées aux nourrissons. *Journal Officiel de la République Algérienne*. 2012.
- [122]. Lutter, C. K. Breastfeeding. In B. Caballero (Éd.), *Encyclopedia of Human Nutrition* (Fourth Edition) (p. 20-29). Academic Press. (2023).
- [123]. Bocquet A, Briend A, Chalumeau M, Dupont C, Darmaun D, De Luca A, Feillet F, Frelut ML, Guimber D, Lapillonne A, Linglart A, Peretti N, Rozé JC, Simeoni U, Turck D, Chouraqui JP. Les nouvelles recommandations du PNNS sur la diversification alimentaire. *Perfectionnement en Pédiatrie*. 1 juill 2022;5(2):127-33.

- [124]. Arsan A, Mosser F, Dartois AM, du Fraysex M. Alimentation de l'enfant de la naissance à 3 ans [Internet]. Doin; 2011 [cité 16 déc 2024]. Disponible sur: <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=8MZtBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT5&dq=alimentation+de+l%27enfant+de+la+naissance+%C3%A0+3+ans&ots=efme9IhbQC&sig=ofaUXRFCjsTT0F1fMj5cQNeekGY>
- [125]. Gómez-Martín M, Arboleya S, Gueimonde M, González S. Nutritional composition of processed baby foods targeted at infants from 0–12 months. *Journal of Food Composition and Analysis*. juin 2019;79:55-62.
- [126]. Baudin B. Déficits nutritionnels en oligoéléments. *Revue Francophone des Laboratoires*. juin 2021;2021(533):25-32.
- [127]. Flynn A. Minerals and trace elements in milk. *Advances in food and nutrition research*. 1992;36:209-52.
- [128]. Metsu D, Caspar-Bauguil S, Galinier A. Carences et excès en micronutriments. *Nutrition Clinique et Métabolisme*. 1 sept 2023;37(3):130-48.
- [129]. Deprez A. Attachement, allaitement, sevrage : y aurait-il une fonction attachement à l'allaitement ? *Spirale - La grande aventure de bébé*. 2014;72(4):79-91.
- [130]. Organization WH. Directives relatives à la préparation, à la conservation et la manipulation dans de bonnes conditions des préparations en poudre pour nourrissons. 2007 [cité 10 déc 2024]; Disponible sur: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43667/9789242595413_fre.pdf
- [131]. 2010 Australian national infant feeding survey: indicator results, Summary [Internet]. Australian Institute of Health and Welfare. 2011 [cité 22 déc 2024]. Disponible sur: <https://www.aihw.gov.au/reports/mothers-babies/2010-australian-national-infant-feeding-survey/summary>
- [132]. Zehnati A, Sidi-Yakhlef A. Prévalence et déterminants de l'allaitement maternel poursuivi au-delà de 6 mois chez les femmes algériennes. Analyse à partir des données de l'enquête par grappes à indicateurs multiples. *Med Trop Sante Int*. 8 mars 2024;4(1):mts.v4i1.2024.499.
- [133]. Victora CG, Bahl R, Barros AJ, França GV, Horton S, Krasevec J, Murch S, Sankar MJ, Walker N, Rollins NC. Breastfeeding in the 21st century: epidemiology, mechanisms, and lifelong effect. *The lancet*. 2016;387(10017):475-90.
- [134]. Agence Nationale d'Accréditation et d'Évaluation en Santé (ANAES). Allaitement maternel : mise en œuvre et poursuite dans les 6 premiers mois de vie de l'enfant. *Recommandations*. Mai 2002.

- [135]. Hassani A, Barkat A, Souilmi FZ, Lyaghfour A, Kabiri M, Karboubi L, Alaoui I, Lamdouar-Bouazzaoui N. La conduite de l'allaitement maternel. Étude prospective de 211 cas à la maternité Souissi de Rabat. *Journal de pédiatrie et de puériculture*. 2005;18(7):343-8.
- [136]. Cheng H, Rossiter C, Size D, Denney-Wilson E. Comprehensiveness of infant formula and bottle feeding resources: A review of information from Australian healthcare organisations. *Maternal & Child Nutrition*. 2022;18(2):e13309.
- [137]. Khiati M. *Nutrition pédiatrique*. 3e éd. Alger : Office des Publications Universitaires; 2014. ISBN : 978-9961-0-1752-4.
- [138]. *Alimentation de l'enfant de 0 à 3 ans. 2: Alimentation au biberon*. Elsevier Masson SAS, 2024. In.
- [139]. Comité suisse pour l'UNICEF. *Nourrir son bébé au biberon Guide pratique d'UNICEF Suisse*. 2015.
- [140]. Traves D. Understanding infant formula. *Paediatrics and Child Health*. sept 2015;25(9):413-7.
- [141]. Bocquet A, Bresson JL, Briend A, Chouraqui JP, Darmaun D, Dupont C, Frelut ML, Ghisolfi J, Goulet O, Putet G, Rieu D, Turck D, Vidailhet M. Préparations pour nourrissons et préparations de suite à base de protéines de soja : données actuelles. *Archives de Pédiatrie*. nov 2001;8(11):1226-33.
- [142]. O'connor NR. Infant Formula. *afp*. 1 avr 2009;79(7):565-70.
- [143]. Robine-Verine C, Brouard J, Eckart P, Duhamel JF. Quoi de neuf dans les laits infantiles ? *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*. févr 1999;12(1):50-5.
- [144]. Martinez JA, Ballew MP. Infant Formulas. *Pediatrics In Review*. 1 mai 2011;32(5):179-89.
- [145]. Muchmore AI. *Food and Drug Regulation: Statutory and Regulatory Supplement*. 2021 [cité 17 déc 2024]; Disponible sur: https://elibrary.law.psu.edu/fac_books/27/
- [146]. Guo M, Ahmad S. Formulation guidelines for infant formula. In: *Human Milk Biochemistry and Infant Formula Manufacturing Technology* [Internet]. Elsevier; 2014 [cité 11 août 2024]. p. 141-71. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845697242500060>
- [147]. <https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-2020-14>.

- [148]. Codex Alimentarius Commission. Norme pour les préparations destinées aux nourrissons et les préparations données à des fins médicales spéciales aux nourrissons. CODEX STAN 72–1981. Adoptée comme norme mondiale en 1981. Amendée en 1983, 1985, 1987, 2011 et 2015. Révisée en 2007.
- [149]. Sanders ME. Probiotics: Definition, Sources, Selection, and Uses. *Clinical Infectious Diseases*. 1 févr 2008;46(Supplement_2):S58-61.
- [150]. Turck D. Safety Aspects in Preparation and Handling of Infant Food. *Ann Nutr Metab*. 2012;60(3):211-4.
- [151]. Gurtler JB, Kornacki JL, Beuchat LR. *Enterobacter sakazakii*: a coliform of increased concern to infant health. *International journal of food microbiology*. 2005;104(1):1-34.
- [152]. Sánchez-Carrillo C, Padilla B, Marín M, Rivera M, Cercenado E, Vigil D, Sánchez-Luna M, Bouza E. Contaminated feeding bottles: the source of an outbreak of *Pseudomonas aeruginosa* infections in a neonatal intensive care unit. *American journal of infection control*. 2009;37(2):150-4.
- [153]. Solomon GM, Weiss PM. Chemical contaminants in breast milk: time trends and regional variability. *Environmental Health Perspectives*. juin 2002;110(6):A339-47.
- [154]. Cattaneo A. Infant and young child feeding and chemical residues. *Breastfeeding Briefs*. 2013;55:1-14.
- [155]. Martín-Carrasco I, Carbonero-Aguilar P, Dahiari B, Moreno IM, Hinojosa M. Comparison between pollutants found in breast milk and infant formula in the last decade: A review. *Science of The Total Environment*. 1 juin 2023;875:162461.
- [156]. Li H, Wan Y, Chen X, Cheng L, Yang X, Xia W, Xu S, Zhang H. A multiregional survey of nickel in outdoor air particulate matter in China: Implication for human exposure. *Chemosphere*. 1 mai 2018;199:702-8.
- [157]. Yusà V, Pardo O. Human risk assessment and regulatory framework for minerals in food. In: De La Guardia M, Garrigues S, éditeurs. *Handbook of Mineral Elements in Food* [Internet]. 1^{re} éd. Wiley; 2015 [cité 21 déc 2024]. p. 69-108. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118654316.ch4>
- [158]. Marín S, Pardo O, Sánchez A, Sanchis Y, Vélez D, Devesa V, Font G, Yusà V. Assessment of metal levels in foodstuffs from the Region of Valencia (Spain). *Toxicology Reports*. 1 janv 2018;5:654-70.
- [159]. Keefe SH, Barber LB, Hubbard LE, Bradley PM, Roth DA, Kolpin DW. Behavior of major and trace elements in a transient surface water/groundwater system following removal of a long-term wastewater treatment facility source. *Science of The Total Environment*. 10 juin 2019;668:867-80.

- [160]. Meltzer HM, Knutsen HK, Skåre JU, Brandtzæg P, Torheim LE, Odland JØ, Løland BF. Benefit and risk assessment of breastmilk for infant health in Norway. 2016 [cité 21 déc 2024]; Disponible sur: <https://munin.uit.no/handle/10037/11391>
- [161]. Keck G. Contaminants et résidus chimiques dans les aliments d'origine animale. *Revue Française des Laboratoires*. 2002;348:21-7.
- [162]. Vázquez M, Calatayud M, Piedra CJ, Chiocchetti GM, Vélez D, Devesa V. Toxic trace elements at gastrointestinal level. *Food and Chemical Toxicology*. 2015;86:163-75.
- [163]. Verdier E. Contaminants dans les aliments : panorama des modes de contamination et des risques. Point pour la pratique du diététicien-nutritionniste. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. 1 avr 2020;55(2):82-8.
- [164]. Mariotti F, Atlan C, Bennetau-Pelissero C, Boutron-Ruault MC, Bresson JL, Bruyere O, De Lauzon-Guillain B, Galinier A, Huneau JF, Kesse-Guyot E. Avis de l'Anses relatif à la prise en compte, parmi les facteurs nutritionnels et environnementaux via l'alimentation durant les 1 000 premiers jours (c'est-à-dire entre la période périconceptionnelle jusqu'à l'âge de 2 ans) de la phase d'allaitement maternel en s'appuyant sur les derniers travaux de l'étude CONTA-LAIT (volet «nutrition») [Internet] [PhD Thesis]. Anses; 2023 [cité 21 déc 2024]. Disponible sur: <https://anses.hal.science/anses-04721514/>
- [165]. Bowen AB, Braden CR. Invasive *Enterobacter sakazakii* disease in infants. *Emerging infectious diseases*. 2006;12(8):1185.
- [166]. de l'Anses A. Étude de l'alimentation totale infantile. 2016 [cité 31 déc 2024]; Disponible sur: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-27586-anses-alimentation-enfants.pdf>
- [167]. Lanasri S, Boukhalfa F, Boussadouna M, Hadjoudj O. Quelle eau en bouteille choisir pour les nourrissons en Algérie ? *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. 1 août 2021;56(4):226-33.
- [168]. Smith SL. Guidelines for Safety and Quality Assurance When Preparing Infant Feedings. *Newborn and Infant Nursing Reviews*. juin 2008;8(2):101-7.
- [169]. Bocquet A, Bresson JL, Briend A, Chouraqui JP, Darmaun D, Dupont C, Frelut ML, Ghisolfi J, Goulet O, Putet G, Rieu D, Turck D, Vidailhet M, Merlin JP, Rives JJ. Alimentation du nourrisson et de l'enfant en bas âge. Réalisation pratique. *Archives de Pédiatrie*. janv 2003;10(1):76-81.
- [170]. Officielles R, De Polynesie S. La protection infantile (de la naissance à 3 ans). 2020 [cité 17 déc 2024]; Disponible sur: <https://www.service-public.pf/dsp/wp-content/uploads/sites/12/2020/09/2020-08-13-Outil-SSP-Protection-infantile.pdf>

- [171]. Rédaction AE. Lancement d'un projet de production de lait infantile [Internet]. Algérie Eco. 2024 août 20 [cité le 21/12/2024]. Disponible sur : <https://www.algerie-eco.com/2024/08/20/lancement-dun-projet-de-production-de-lait-infantile/>.
- [172]. Algérie360. Industrie : vers la production du lait infantile en Algérie [Internet]. 2022 août 3 [cité le 30/08/2024]. Disponible sur : <https://www.algerie360.com/industrie-vers-la-production-du-lait-infantile-en-algerie/>.
- [173]. L'Expression DZ. Baladna produira du lait infantile [Internet]. L'Expression ; [cité le 21/12/2024]. Disponible sur : <https://www.l'expressiondz.com/nationale/baladna-produira-du-lait-infantile-386008>.
- [174]. Population et Emploi [Internet]. [cité 13 nov 2024]. Disponible sur: https://www.interieur.gov.dz/Monographie/article_detail.php?lien=1390&wilaya=23
- [175]. Quelles sont les communes de la wilaya d'Annaba ? [Internet]. Gifex. 2022 [cité 3 déc 2024]. Disponible sur: <https://gifex.com/fr/fichier/quelles-sont-les-communes-de-la-wilaya-d-annaba/>
- [176]. Tosyali Algérie. Tosyali Algérie [Internet]. Béthioua (Algérie): Tosyali Holding ; [consulté le 17 mai 2025]. Disponible sur : <https://www.tosyali-algerie.com/>.
- [177]. Calculatrice de taille d'échantillon | SurveyMonkey [Internet]. [cité 30 nov 2024]. Disponible sur: <https://fr.surveymonkey.com/mp/sample-size-calculator/>
- [178]. Assia B. Facteurs associés à la pratique de l'allaitement selon les données de l'enquête par Grappes à Indicateurs Multiples MICS6 Factors associated with breastfeeding practice based on multiple indicator cluster survey data MICS6. *Revue EL-Bahith en Sciences Humaines et Sociales* ISSN. 13(04):2021.
- [179]. Mecheri-Touati D, Bensalem A, Oulamara H. P249: Allaitement maternel et facteurs associés a constantine (Algérie). *Nutrition Clinique et Métabolisme*. 1 déc 2014;28:S199.
- [180]. Boumaraf H, Belkadi M, Bouderdia Z, Nezzal L. SFP-P085–Néonatalogie–Suivi de la grossesse et mortalité à Constantine. *Archives de Pédiatrie*. 2008;15(5):969-70.
- [181]. Lauer JA, Betrán AP, Victora CG, de Onís M, Barros AJ. Breastfeeding patterns and exposure to suboptimal breastfeeding among children in developing countries: review and analysis of nationally representative surveys. *BMC Med*. 1 juill 2004;2(1):26.
- [182]. Charpentier E. Étude descriptive des raisons du choix de l'allaitement artificiel. 2012 [cité 8 févr 2025]; Disponible sur: <https://policycommons.net/artifacts/15653595/etude-descriptive-des-raisons-du-choix-de-lallaitement-artificiel/16544460/>
- [183]. Siret V, Castel C, Boileau P, Castetbon K, l'Hélias LF. Facteurs associés à l'allaitement maternel du nourrisson jusqu'à 6 mois à la maternité de l'hôpital Antoine-Béclère, Clamart. *Archives de pédiatrie*. 2008;15(7):1167-73.

- [184]. Houssaini ZS, Inekac S, Hassani MB, Ouhsine M, Guessous Z. Situation Actuelle Et Facteurs Influençant L'allaitement Dans La Ville De Rabat Au Maroc A Propos D'une Enquête Chez 275 Mères. Eur Sci J [Internet] [Internet]. 2017 [cité 10 févr 2025];31. Disponible sur: <https://www.academia.edu/download/52737673/15.pdf>
- [185]. Fanello S, Moreau-Gout I, Cotinat JP, Descamps P. Critères de choix concernant l'alimentation du nouveau-né: une enquête auprès de 308 femmes. Archives de pédiatrie. 2003;10(1):19-24.
- [186]. Kanteng GAW, Lubala TK, Mutombo AM, Mutoke GN, Kasongo AN, Wembonyama SO, Luboya ON. Perception de l'allaitement maternel et de la diversification alimentaire dans une zone urbaine congolaise. Pan African Medical Journal [Internet]. 2014 [cité 10 févr 2025];19(1). Disponible sur: <https://www.ajol.info/index.php/amj/article/view/227666>
- [187]. Mouroufie AKJ, Kouakou EKV, Kouakou Firmin K, Tanoh FE, Kouakou AC. Evaluation of Factors Influencing Breastfeeding in Children Aged 0 to 24 Months Received in an Urban Community Health Center in Abidjan Cocody (Côte d'Ivoire). J Palliat Care Med. 2019;9(348):2.
- [188]. Kersuzan C, Gojard S, Tichit C, Thierry X, Wagner S, Nicklaus S, Geay B, Charles MA, Lioret S, de Lauzon-Guillain B. Prévalence de l'allaitement à la maternité selon les caractéristiques des parents et les conditions de l'accouchement. Résultats de l'Enquête Elfe maternité, France métropolitaine, 2011. Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire - BEH. 2014;(27):440-9.
- [189]. Lemarchand L. Babillage et diversification alimentaire : pratiques et influence de l'exposition aux textures sur le contrôle oro-moteur [Internet] [phdthesis]. Université de Lyon ; Université de Montréal (1978-....); 2019 [cité 10 févr 2025]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-02132508>
- [190]. Robert E, Despiegelaere M, Dramaix M, Swennen B. Estimation de la prévalence de l'allaitement maternel au travers d'une enquête en population de couverture vaccinale en Belgique francophone en 2009. Archives de Pédiatrie. avr 2014;21(4):355-62.
- [191]. Bekhtaoui A. Facteurs associés à la pratique de l'allaitement selon les données de l'enquête par Grappes à Indicateurs Multiples MICS6. RBSHS. 31 oct 2021;13(4):591-8.
- [192]. Kadi H, Bouldjadja I, Medkourb I, Lamireau T, Nezzal L, Bounecer H. Initiation Et Duree De L'allaitement Maternel: Enquete Dans La Ville D'El Khroub (2015). Sciences & Technologie C, Biotechnologies. 2017;9-16.
- [193]. Fischer TP, Olson BH. A Qualitative Study to Understand Cultural Factors Affecting a Mother's Decision to Breast or Formula Feed. J Hum Lact. mai 2014;30(2):209-16.

- [194]. Malek L, Duffy G, Fowler H, Katzer L. Use and understanding of labelling information when preparing infant formula: Evidence from interviews and eye tracking. *Food Policy*. mai 2020;93:101892.
- [195]. Spalinger J. Alimentation au cours des 1000 premiers jours. *Prim Hosp Care (fr)* [Internet]. 2 oct 2019 [cité 11 août 2024]; Disponible sur: <https://doi.emh.ch/phc-f.2019.10130>
- [196]. Nasri H, Bouaïcha N. Blooms of toxic cyanobacteria in freshwater in Algeria. *Water Conserv Manag*. 2017;1(2):05-6.
- [197]. Amrani A, Zaidi H, Boumendjel M, Nasri H. Cyanobactéries toxiques et leur impact sur la santé publique. *Environnement, Risques & Santé*. 2020;19(5):320-6.
- [198]. Hulin M, Sirot V, Jean J, Héral V, Traore T, Mahé A, Vin K, Rivière G. Étude française de l'alimentation totale infantile: principaux résultats et recommandations. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. oct 2019;54(5):275-85.
- [199]. Camus D, Vendittelli F, Leymarie MC, Sauvart-Rochat MP. Engagement des sages-femmes vers la promotion de la santé environnementale selon leur cadre d'exercice professionnel (hospitalier versus libéral). Université Clermont-Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal; 63000 Clermont-Ferrand, France.
- [200]. Acosta PM. Four à micro-ondes : bénéfique ou maléfique?
- [201]. Laadjel R, Taleb S. Facteurs associés à l'âge d'initiation de la diversification alimentaire chez des enfants âgés de 6 à 60 mois dans l'est algérien : corrélation à l'état nutritionnel. *Nutrition Clinique et Métabolisme*. 1 oct 2020;34(3):238-47.
- [202]. Bournez M. Déterminants des pratiques de diversification alimentaire des enfants de l'étude ELFE : données de santé, caractéristiques socio-économiques et démographiques familiales, croissance précoce de l'enfant. [Internet] [phdthesis]. Université Bourgogne Franche-Comté; 2018 [cité 10 févr 2025]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-02517038>
- [203]. Rochoy M, Mameche-Yazit A, Puzkarek T, Carré M. Diversification alimentaire chez les enfants de 6 à 12 mois : connaissances des parents et facteurs influençant leurs pratiques. *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*. 1 oct 2021;34(5):262-70.
- [204]. Banti T, Carsin A, Chabrol B, Reynaud R, Fabre A. Diversification alimentaire du nourrisson. Évaluation des pratiques en regard des recommandations françaises actuelles chez les pédiatres varois et les internes affectés à la faculté d'Aix-Marseille. *Archives de Pédiatrie*. oct 2016;23(10):1018-27.

- [205]. Deschanvres C, Levieux K, Launay E, Hanf M, Gras le Guen C, Ancremin A. Couverture vaccinale et mort inattendue du nourrisson. Étude prospective nationale. *Med Mal Infect.* juin 2017;47(4):S131.
- [206]. Ministère de la Santé, de la Population et de la Réforme Hospitalière, UNICEF, UNFPA. Enquête par Grappes à Indicateurs Multiples (MICS) 2012-2013 : suivi de la situation des enfants et des femmes en Algérie. Alger : Ministère de la Santé, de la Population et de la Réforme Hospitalière ; 2015.
- [207]. Food, Organization (WHO) AO (FAO)/World H. The CODEX General Guidelines on Sampling–CAC/GL 50-2004. WHO Rome, Italy; 2004.
- [208]. Standardization IO for. ISO 2859-0: 1995: Sampling Procedures for Inspection by Attributes-Part 0: Introduction to the ISO 2859 Attribute Sampling System. International Organization for Standardization; 1995.
- [209]. Session Rdltq, Du Comité D, Les Contaminants AAE. Programme Mixte Fao/Oms Sur Les Normes Alimentaires Commission Du Codex Alimentarius Vingt-cinquième session Rome (Italie), 30 juin-05 juillet 2003. 2002 [cité 28 nov 2024]; Disponible sur: https://www.fao.org/input/download/report/28/al03_12f.pdf
- [210]. Environment UN. Global Monitoring Plan: Protocol for POPs sampling - Human milk | UNEP - UN Environment Programme [Internet]. 2022 [cité 28 nov 2024]. Disponible sur: <https://www.unep.org/resources/toolkits-manuals-and-guides/global-monitoring-plan-protocol-pops-sampling-human-milk>
- [211]. Yaman M, Çokol N. Determination of trace elements in human milk, cow's milk, and baby foods by flame AAS using wet ashing and microwave oven sample digestion procedures. *Atomic Spectroscopy-Norwalk Connecticut.* 2004;25:185-90.
- [212]. Sample Preparation by Wet Digestion Method for the Analysis of Heavy Metals & Minerals Using AAS - YouTube [Internet]. [cité 25 déc 2024]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=vAEyeroMfWk&t=783s>
- [213]. Abushaala M, Elhafi G, Ehmeza N, Amer A. Monitoring of Toxic Heavy Metal Residues in Infant Dried Dairy Products. *Alexandria Journal of Veterinary Sciences.* 31 juill 2022;74.
- [214]. Chao HH, Guo CH, Huang CB, Chen PC, Li HC, Hsiung DY, Chou YK. Arsenic, Cadmium, Lead, and Aluminium Concentrations in Human Milk at Early Stages of Lactation. *Pediatrics & Neonatology.* 1 avr 2014;55(2):127-34.
- [215]. ORGM : le 1^{er} laboratoire de sciences minérales accrédité aux normes internationales [Internet]. Étudiant Algérien. 2022 [cité le 26 déc 2024]. Disponible sur : <https://etudiant-algerien.com/orgm-le-1e-laboratoire-de-sciences-minerales-accredite-aux-normes-internationales/>.

- [216]. AE R. Sonarem : accréditation de deux laboratoires l'ORGM [Internet]. *Algerie Eco*. 2024 [cité 13 déc 2024]. Disponible sur: <https://www.algerie-eco.com/2024/10/07/sonarem-accreditation-de-deux-laboratoires-lorgm/>
- [217]. National Health and Family Planning Commission; China Food and Drug Administration. GB 5009.268–2016 : Norme nationale de sécurité alimentaire – Détermination de l'aluminium [Internet]. Beijing : China Standards Press; 2016 [cité 2025 janv. 27]. Disponible sur : <https://www.codeofchina.com/standard/GB5009.268-2016.html>.
- [218]. Pavesi T, Moreira JC. Mechanisms and individuality in chromium toxicity in humans. *J of Applied Toxicology*. sept 2020;40(9):1183-97.
- [219]. de Paiva EL, Ali S, Vasco ER, Alvito PC, de Oliveira CAF. Bioaccessibility data of potentially toxic elements in complementary foods for infants: A review. *Food Research International*. 1 déc 2023;174:113485.
- [220]. Standardization Administration of China. GB 5413.21–2010: National Standardization Administration of China. GB 5413.21–2010 : National Food Safety Standard – Determination of Fe, Zn, Ca, Mg, K, Na, Cu, and Mn in Foods for Infants and Young Children, Milk and Milk Products [Internet]. Beijing : China Standards Press; 2010 [cité 2025 janv. 27]. Disponible sur : <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GB5413.21-2010>.
- [221]. Lin X, Wu X, Li X, Zhang D, Zheng Q, Xu J, Lu S. Infant exposure to trace elements in breast milk, infant formulas and complementary foods from southern China. *Science of The Total Environment*. 10 sept 2022;838:156597.
- [222]. Koletzko B, Bhutta ZA, Cai W, Dhansay MA, Duggan CP, Makrides M, Orsi M. *Pediatric Nutrition in Practice*. Karger Medical and Scientific Publishers; 2022. 476 p.
- [223]. Organisation mondiale de la Santé (OMS). Cours de formation sur l'évaluation de la croissance de l'enfant : Normes OMS de croissance de l'enfant. Information et conseils sur la croissance et l'alimentation. Genève : Département Nutrition pour la santé et le développement ; 2008.
- [224]. Institut national de santé publique du Québec. Mieux vivre avec notre enfant de la grossesse à 2 ans : guide pratique pour les parents. 2024. Disponible à : <https://www.inspq.qc.ca/mieux-vivre/alimentation/nourrir-bebe-au-biberon/quantite-de-lait>.
- [225]. Grummer-Strawn LM, Reinold CM, Krebs NF. Centers for Disease Control and Prevention Use of World Health Organization and CDC Growth Charts for Children Aged 0–59 Months in the United States. [(accessed on 1 October 2016)].

- [226]. de Onis M, Garza C, Onyango AW, Borghi E. Comparison of the WHO Child Growth Standards and the CDC 2000 Growth Charts¹. *The Journal of Nutrition*. 1 janv 2007;137(1):144-8.
- [227]. Paediatr Child Health. Le guide d'utilisation des nouvelles courbes de croissance de l'OMS à l'intention du professionnel de la santé. *Paediatr Child Health*. 2010;15(2):84-90.
- [228]. Food Marketing Institute. Toxic Elements in Baby and Toddler Foods Backgrounder. Updated July 2023. Disponible à : https://www.fmi.org/docs/default-source/food-safety/fmi-heavy-metals-in-baby-food-backgrounder---july-10-2023.pdf?sfvrsn=75564df4_3.
- [229]. Commission européenne. Règlement (UE) 2023/915 de la Commission du 25 avril 2023 concernant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires et abrogeant le règlement (CE) n° 1881/2006. *Journal officiel de l'Union européenne*. 5 mai 2023; L119:103-157. Disponible à : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32023R0915>.
- [230]. Règlementation-2020-160803-Composition-préparations-pour-nourrissons-et-de-suite [Internet]. *Laits.fr*; 2020 [cité le 1er février 2025]. Disponible sur: <https://www.laits.fr/actualite/>.
- [231]. Plessi M, Bertelli D, Monzani A. Determination of Aluminum and Zinc in Infant Formulas and Infant Foods. *Journal of Food Composition and Analysis*. mars 1997;10(1) :36-42.
- [232]. Stahl T, Falk S, Taschan H, Boschek B, Brunn H. Evaluation of human exposure to aluminum from food and food contact materials. *Eur Food Res Technol*. 1 déc 2018;244(12):2077-84.
- [233]. Kazi TG, Jalbani N, Baig JA, Afridi HI, Kandhro GA, Arain MB, Jamali MK, Shah AQ. Determination of toxic elements in infant formulae by using electrothermal atomic absorption spectrometer. *Food and Chemical Toxicology*. juill 2009;47(7):1425-9.
- [234]. Navarro I, Alvarez JI, Villa I. Ingesta de Aluminio en Lactantes Alimentados con Fórmulas Infantiles. *Acta Pediatr Esp*. 2003;
- [235]. Biego GH, Joyeux M, Hartemann P, Debry G. Determination of mineral contents in different kinds of milk and estimation of dietary intake in infants. *Food Additives and Contaminants*. oct 1998;15(7):775-81.

- [236]. Palmer G. The politics of breastfeeding: When breasts are bad for business [Internet]. Pinter & Martin Publishers; 2009 [cité 11 févr 2025]. Disponible sur: <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=qHXrAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT9&dq=Palmer,+Gabrielle,+%22The+Politics+of+Breastfeeding%22,+&ots=Gnmr1S5Cz5&sig=aQFX1tqAVGWqGvRA7nhl8JPjtZw>
- [237]. Peirovi-Minaee R, Taghavi M, Harimi M, Zarei A. Trace elements in commercially available infant formulas in Iran: Determination and estimation of health risks. *Food and Chemical Toxicology*. 1 avr 2024; 186:114588.
- [238]. Ahmed AAH, Mohammed EEP, Amin MM, Abdel-Raheem DAN. Aluminum level in infants' powdered milk based formulae. *Journal of Advanced Veterinary Research*. 2016;6(4):104-7.
- [239]. Ljung K, Palm B, Grandér M, Vahter M. High concentrations of essential and toxic elements in infant formula and infant foods—A matter of concern. *Food chemistry*. 2011;127(3):943-51.
- [240]. Woollard DC, Pybus J, Woollard GA. Aluminium concentrations in infant formulae. *Food Chemistry*. 1 janv 1990;37(2):81-94.
- [241]. Chuchu N, Patel B, Sebastian B, Exley C. The aluminium content of infant formulas remains too high. *BMC pediatrics*. 2013;13(1):1-5.
- [242]. Burrell SAM, Exley C. There is (still) too much aluminium in infant formulas. *BMC pediatrics*. 2010;10(1):1-4.
- [243]. Redgrove J, Rodriguez I, Mahadevan-Bava S, Exley C. Prescription Infant Formulas Are Contaminated with Aluminium. *IJERPH*. 12 mars 2019;16(5):899.
- [244]. Freundlich M, Abitbol C, Zilleruelo G, Strauss J, Faugere MC, Malluche H. Infant formula as a cause of aluminium toxicity in neonatal uraemia. *The Lancet*. 1985;326(8454):527-9.
- [245]. Weintraub R, Hams G, Meerkin M, Rosenberg AR. High aluminium content of infant milk formulas. *Archives of Disease in Childhood*. 1 sept 1986;61(9):914-6.
- [246]. Stahl T, Falk S, Taschan H, Boschek B, Brunn H. Evaluation of human exposure to aluminum from food and food contact materials. *Eur Food Res Technol*. déc 2018;244(12):2077-84.
- [247]. Elaridi J, Dimassi H, Estephan M, Hassan HF. Determination of Aluminum, Chromium, and Barium Concentrations in Infant Formula Marketed in Lebanon. *J Food Prot*. 1 oct 2020;83(10):1738-44.
- [248]. 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.

- [249]. Koyashiki GAK, Paoliello MMB, Tchounwou PB. Lead Levels in Human Milk and Children's Health Risk: A Systematic Review. *Reviews on Environmental Health* [Internet]. janv 2010 [cité 24 févr 2025];25(3). Disponible sur: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/REVEH.2010.25.3.243/html>
- [250]. World Health Organization. *Infant and young child feeding: principles for nutritional assessment*. Geneva: WHO; 1989.
- [251]. Hernández-Méndez J, Carabias-Martínez R, Moreno-Cordero B, Gutiérrez-Dávila L. Spectrophotometric determination of aluminium with alizarin red S sensitized with polyvinylpyrrolidone. *Analytica Chimica Acta*. 1983;149:379-83.
- [252]. Al-Husseini ZNO, Adnan MA, AL-Hussain MA. Determination of Aluminum (III) by Alizarin DYE in Pharmaceutical Sample and Aqueous Solution. *The Egyptian Journal of Hospital Medicine*. 2022;89(2):7600-7.
- [253]. Tounian P, Javalet M. 2 - Alimentation au biberon. In: Tounian P, Javalet M, éditeurs. *Alimentation de l'enfant de 0 a 3 ans (Fourth Edition)* [Internet]. Paris: Content Repository Only!; 2024 [cité 19 sept 2024]. p. 17-44. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9782294779589000024>
- [254]. hpboudjebbour. Fichier PDF Annaba.pdf [Internet]. Fichier PDF. [cité 25 déc 2024]. Disponible sur: <https://www.fichier-pdf.fr/2013/12/08/annaba/>
- [255]. Edition F. Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle*. 2011;38(4):104-8.
- [256]. Bridgewater LL, Baird RB, Eaton AD, Rice EW, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, éditeurs. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd edition. Washington, DC: American Public Health Association; 2017. 1 p.
- [257]. Hein H, Müller H, Witte I. *Water and environmental analysis with the UV/vis spectrometer Lambda 2*. Perkin-Elmer Überlingen. 1992;
- [258]. Plackett RL, Burman JP. The design of optimum multifactorial experiments. *Biometrika*. 1946;33(4):305-25.
- [259]. Taguchi G. *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes* [Internet]. Tokyo: The Organization; 1986 [cité 12 avr 2025]. 214 p. Disponible sur: <http://archive.org/details/introductiontoqu0000tagu>
- [260]. Schimmerling, Paul, SISSON, Jean Claude, et Zaïdi, Ali. *Pratique des plans d'expériences*. TEC & DOC, 1998.
- [261]. M F. Labostat – *Guide de validation des méthodes d'analyse*. Lavoisier; 2009. 387 p.

- [262]. R104 - General Requirements for the Accreditation of Field Testing and Field Calibration Laboratories. ISO/IEC 17025:2017. International Organization for Standardization; 2017.
- [263]. NF EN ISO/CEI 17025. Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais. Septembre 2005.
- [264]. AFNOR. Analyse des produits agricoles et alimentaires - Protocole de caractérisation en vue de la validation d'une méthode d'analyse quantitative par construction d'un profil d'exactitude. NF V03-110. Paris : Association Française de Normalisation ; 2010.
- [265]. Comité Français d'Accréditation (Cofrac). LAB GTA 05 - Analyses physico-chimiques des eaux. Révision 03. Disponible sur : https://tools.cofrac.fr/fr/documentation/index.php?fol_id=50. Consulté le 7 décembre 2024.
- [266]. Eaux destinées à la consommation humaine - Risques sanitaires, contrôle et réglementation : Eaux destinées à la consommation humaine : origine et vulnérabilité des ressources | Techniques de l'Ingénieur [Internet]. [cité 7 déc 2024]. Disponible sur: <https://www-techniques-ingenieur-fr.snd11.arn.dz/base-documentaire/environnement-securite-th5/eau-proprietes-qualite-valeurs-d-usage-42506210/eaux-destinees-a-la-consommation-humaine-w2002/eaux-destinees-a-la-consommation-humaine-origine-et-vulnerabilite-des-ressources-w2002v2niv10001.html>
- [267]. ANSES. Guide de validation des méthodes d'analyses. ANSES/PR3/07/01, version a. 28 octobre 2015.
- [268]. Hubert P, Nguyen-Huu JJ, Boulanger B, Chapuzet E, Chiap P, Cohen N, Compagnon PA, Dewé W, Feinberg M, Lallier M. Validation des procédures analytiques quantitatives, harmonisation des démarches. STP Pharma Pratiques [Internet]. 2003 [cité 7 déc 2024];13(3). Disponible sur: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/22157>
- [269]. Journal Officiel de la République Algérienne. Décret exécutif n°14-96 du 2 Joumada El Oula 1435 (4 mars 2014) modifiant et complétant le décret exécutif n°11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 (22 mars 2011) relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine. JORA. 2014;(137):9 mars.
- [270]. Journal officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire. Caractéristiques de qualité des eaux de source et des eaux minérales naturelles. 6 Rabie Ethani 1436 correspondant au 27 janvier 2015, n°03, p. 26.
- [271]. Hazzab A. Eaux minérales naturelles et eaux de sources en Algérie. Comptes Rendus Géoscience. 2011;343(1):20-31.
- [272]. Dick BA, Ammar MB, Sidi YMO, Learoussy HY, Cheikh ME. Evaluation of Aluminum Levels in Drinking Water of Nouakchott. Journal of Pharmacy and Pharmacology. 2021;9:210-3.

- [273]. Ahmad M, Abu-Taweel GM, Ajarem JS. The risk of aluminium neurotoxicity for young animals and humans due to multiple exposure opportunities, particularly perinatal.
- [274]. Arrêté du 30 mars 2011 fixant la liste des produits chimiques utilisables pour le traitement et la correction des eaux de consommation humaine. Journal officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire. 17 Rabie Ethani 1432, n°11, 22 mars 2011.
- [275]. Stahl T, Falk S, Rohrbeck A, Georgii S, Herzog C, Wiegand A, Hotz S, Boschek B, Zorn H, Brunn H. Migration of aluminum from food contact materials to food—a health risk for consumers? Part III of III: migration of aluminum to food from camping dishes and utensils made of aluminum. Environ Sci Eur. déc 2017;29(1):17.
- [276]. Tardat-Henry M, Beaudry JP. Chimie des eaux. Éditions Le Griffon d'argile; 1992.
- [277]. ISO 9297:1989. Qualité de l'eau - Dosage des chlorures - Titration au nitrate d'argent avec du chromate comme indicateur (Méthode de Mohr). Genève : Organisation internationale de normalisation ; 1989.
- [278]. ISO 10359-1:1992. Qualité de l'eau - Dosage des fluorures - Partie 1 : Méthode de la sonde électrochimique pour l'eau potable et faiblement polluée. Genève : Organisation internationale de normalisation ; 1992.
- [279]. Rodier J, Legube B, Merlet N, et coll. L'analyse de l'eau. 9e éd. Paris : Dunod ; 2009.
- [280]. Cordella C. L'analyse en composantes principales.
- [281]. Gonzalez PL. L'analyse en composantes principales (ACP). Study report [Internet]. [cité 2 mars 2025] ; Disponible sur: <https://www.academia.edu/download/56475057/A-C-P-.pdf>
- [282]. Roger JM, Servien R, Boulet JC, Tremblay-Franco M, Jaillais B, Boccard J, Giacomoni F, Brandolini-Bunlon M, Pujos-Guillot E, Guitton Y, Lebegue C, Hanafi M, Rutledge D. Chimie et Métabolisme. Annales des falsifications, de l'expertise chimique et toxicologique. 2021;780-4.
- [283]. Mouissi S, Alayat H. Utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour la caractérisation Physico-chimique des eaux d'un écosystème aquatique: Cas du Lac Oubéira (Extrême NE Algérie). Journal of Materials and Environmental Science. 2016;7(6):2214-20.
- [284]. Journal officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire. Caractéristiques de qualité des eaux de source. 27 Rabie El Aouel 1427, n°27, 26 avril 2006.

- [285]. Rapport du comité d'experts spécialisé « eaux » concernant les critères de qualité des eaux minérales naturelles et des eaux de source embouteillées permettant une consommation sans risque sanitaire pour les nourrissons et les enfants en bas âge [Internet]. Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. 2003 [cité 30 déc 2024]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/rapport-du-comite-dexperts-specialise-eaux-concernant-les-criteres-de-qualite-des-eaux-0>
- [286]. Rania A, Brahmi F, Ounassa A. Evaluation of the secondary effects of a heavy metal on the biochemical and histological level of the cardiac system and its possible remediation by some trace elements in the wistar rat . 2023.
- [287]. Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE. Multivariate data analysis. 7th ed. Upper Saddle River (NJ): Pearson Prentice Hall; 2010.
- [288]. Exley C. A biogeochemical cycle for aluminium? *J Inorg Biochem.* 2003 Sep 15; 97(1):1-7.
- [289]. Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2003.
- [290]. Smedley PL, Kinniburgh DG. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl Geochem.* 2002;17(5):517-568. doi:10.1016/S0883-2927(02)00018-5.
- [291]. Brindha K, Elango L. Fluoride in groundwater: causes, implications and mitigation measures. In: Monroy SD, editor. Fluoride: properties, applications and environmental management. Hauppauge (NY): Nova Science Publishers; 2011. p. 111-136.
- [292]. Flaten TP. Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. *Brain Res Bull.* 2001 May 15;55(2):187-196. doi:10.1016/S0361-9230(01)00459-2.
- [293]. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for aluminum. Atlanta (GA): U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2008.
- [294]. Reed BE, Matsumoto MR, Jensen JN, McGinley P. Physicochemical processes. *Water Environ Res.* 1994;66(4):309-324.
- [295]. Lenntech. L'aluminium (Al) et l'eau [Internet]. Disponible sur : <https://www.lenntech.fr/periodique/l-aluminium-dans-l-eau-al+h2o-.htm>.
- [296]. Meghzili B, Brakchi S, Abdelkrim A. Risk of residual aluminum in treated waters with aluminum sulphate. *Adv Res.* 2016;6(5):1-8. doi:10.9734/AIR/2016/24059.

ANNEXES

ANNEXE 1. Questionnaire destiné aux mamans de nourrissons

Madame, ce questionnaire servira dans le cadre d'un travail scientifique. Je vous remercie de bien vouloir consacrer quelques minutes pour répondre au questionnaire ci-dessous. Vos réponses resteront anonymes.

CARACTERISTIQUES DES MAMANS

Age de la maman : ans

Etat matrimonial :

Célibataire

Veuve

Mariée

Divorcée

Niveau d'études :

Analphabète

Secondaire

Primaire

Universitaire

Moyen

Profession :

Mère au foyer

Fonction libérale

Fonctionnaire

Etudiante

Employée

Vous êtes femme active ? :

Oui

Non

Si oui, veuillez indiquer le nombre d'heures de travail par semaine :

Lieu d'habitat :

Urbain

Semi-urbain

Rural

Commune :

Annaba

Seraïdi

Eulma

El Bouni

Berrahal

Cheurfa

Sidi Amar

Oued El Aneb

Treat

El Hadjar

Aïn El Berda

Chétaïbi

Parité :

Primipare

Multipare, nombre d'enfants :

Rang de naissance de ce bébé :

La fratrie de ce bébé a été allaitée :

- Au sein exclusivement
 Au biberon exclusivement (avec le lait artificiel)
 Allaitement mixte

Age gestationnel du dernier accouchement :

- Prématuré Normotermes Dépassement de terme

Mode du dernier accouchement :

- Voie basse Césarienne

CARACTERISTIQUES DU NOURRISSON

Sexe du bébé :

- Masculin Féminin

Age : mois et jours

Poids à la naissance (g) :

- Hypotrophie Normal Macrosomie

Etat staturo-pondéral actuel :

- Maigre Normal Surpoids/Obésité

Notion de souffrance fœtale :

- Oui Non

MODALITES D'ALLAITEMENT

Tabagisme :

- Oui Non

Votre bébé actuel est nourri :

- Allaitement maternel exclusif Allaitement artificiel exclusif
 Allaitement maternel prédominant Allaitement partiel
 Lait de vache

Motivations pour avoir choisi l'allaitement maternel :

- Meilleur pour la santé de l'enfant Bienfaits pour la mère
 Contact mère-enfant Choix du mari
 Facile pour la pratique (pas de stérilisation) Coutume familiale
 Economique Refus du biberon

Moment de prise de décision du choix de l'allaitement maternel :

- Depuis toujours Au milieu de la grossesse
 Avant conception Après la naissance
 Début de grossesse

Mise au sein :

- Après accouchement 3^{ème} jour de l'accouchement
 1^{er} jour de l'accouchement Après le 3^{ème} jour de l'accouchement
 2^{ème} jour de l'accouchement

Motivations pour avoir choisi l'allaitement artificiel :

- Refus de tétée Préserver l'esthétique de la poitrine
 Facilité de l'allaitement artificiel Maladie de l'enfant/hospitalisation
 Manque de lait maternel Problème de seins (anatomie...)
 Facilité à reprendre le travail Césarienne
 Maladie de la maman/hospitalisation Nouvelle grossesse

Moment de prise de décision du choix de l'allaitement artificiel :

- Depuis toujours Au milieu de la grossesse
 Avant conception Après la naissance
 Début de grossesse

Quelle est la marque du lait artificiel que vous utilisez pour votre bébé ?:

| Marque | Gamme | Age | | Marque | Gamme | Age | |
|---------|-------|-----------------|------------------|-------------|-------|-----------------|------------------|
| | | 1 ^{er} | 2 ^{ème} | | | 1 ^{er} | 2 ^{ème} |
| Celia | | | | France Lait | | | |
| Nan | | | | Nursie | | | |
| Aptamil | | | | Primalac | | | |
| Biomil | | | | Novalac | | | |
| Guigoz | | | | Modilac | | | |

Combien de biberons donnez-vous à votre bébé par jour ?

Quelle est la quantité que vous préparez à chaque fois (en millilitre) ?

Quel type d'eau utilisez-vous pour la préparation du biberon ?

- Eau en bouteille Eau de camion-citerne
 Eau de source naturelle Eau du robinet bouillie

Si vous utilisez l'eau en bouteille, vous utilisez :

- N'importe quelle marque Marque précise :.....

Si vous chauffez l'eau, vous utilisez :

- Casserole
 Bain-Marie
 Chauffe biberon
 Micro-onde

Pour préparer le biberon, vous chauffez l'eau dans un ustensile de cuisine en :

- Aluminium Granite
 Inox Verre
 Cuivre Fonte

Autres moyens de chauffage : Micro-onde Chauffe biberon Bain-Marie

Avez-vous l'habitude de réchauffer le biberon déjà préparé et non consommé ?

- Non Oui

AUTRES

Avez-vous commencé la diversification alimentaire ?

- Non Oui

Si oui, A quel âge ? < 6 mois ≥ 6mois

A quel âge avez-vous introduit le lait de vache ? mois et jour

Antécédents médicaux de l'enfant :

Présence d'allergies :

- Non Oui

Si oui, quel type ?

- Respiratoire Cutanée (eczéma)
 Protéines du lait de vache Médicamenteuse

Votre bébé est-il à jour pour ses vaccins ?

- Oui
 Non

Si non, nombre d'antigènes vaccinaux en retard :

ANNEXE 2. Fiche de renseignement

Questionnaire pour les donneuses de lait maternel

Etes-vous une mère de bébé de six mois ou moins ?

Oui

Non

Quel est votre âge ? [] [] ans

Quel est votre niveau d'étude ?

Analphabète

Secondaire

Primaire

Universitaire

Moyen

Vous êtes femme active ? :

Oui

Non

Lieu d'habitat :

Vivez-vous à Annaba depuis au moins 3 ans ?

Oui

Non

Parité :

Primipare

Multipare

Votre grossesse et accouchement se sont-ils déroulés sans complications ? :

Oui

Non

Age gestationnel du dernier accouchement (en semaines) : [] []

Prenez-vous actuellement des compléments alimentaires contenant des sels minéraux ? :

Oui

Non

Prenez-vous actuellement des médicaments comme les antiacides ? :

Oui

Non

Sexe du bébé :

Masculin

Féminin

Age : [] [] mois et [] [] jours

Poids à la naissance (g) : [] [] [] []

Taille à la naissance : [] [] []

Type d'allaitement du votre bébé :

Allaitement maternel exclusif

Allaitement partiel

Avez-vous commencé la diversification alimentaire

Oui

Non

ANNEXE 3. Fiche de prélèvement des préparations infantiles pour nourrissons

| Code | Date | Marque | Type/âge | N°lot | Date de fab. & date de pér. | Lieu de pvmt. | Poids (g) |
|-------------|-------------|---------------|-----------------|--------------|----------------------------------------|----------------------|------------------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

ANNEXE 4. Identification des préparations pour nourrissons analysées

| | Marque | Gamme | Code | Marque | Gamme |
|-----|---------|---------------|------|-------------|-------------------|
| L1 | NAN | 1 | L32 | BIOMIL | SOY |
| L2 | NAN | 2 | L33 | FRANCE LAIT | Pré |
| L3 | NAN | Confort 1 | L34 | FRANCE LAIT | 1 |
| L4 | NAN | Confort 2 | L35 | FRANCE LAIT | 1 |
| L5 | NAN | Pré | L36 | FRANCE LAIT | 2 |
| L6 | NAN | Pré | L37 | FRANCE LAIT | Confort 1 |
| L7 | NEURSIE | 1 | L38 | FRANCE LAIT | Confort 2 |
| L8 | NEURSIE | 1 | L39 | FRANCE LAIT | LF |
| L9 | NEURSIE | 2 | L40 | FRANCE LAIT | AR |
| L10 | NEURSIE | 2 | L41 | APTAMIL | Premium+ 1 |
| L11 | NEURSIE | Confort 1 | L42 | APTAMIL | Premium+ 1 |
| L12 | NEURSIE | Confort 1 | L43 | APTAMIL | Premium+ 2 |
| L13 | NEURSIE | Confort 2 | L44 | APTAMIL | Premium+ 2 |
| L14 | NEURSIE | Expertise + 2 | L45 | APTAMIL | En Cas d'Allergie |
| L15 | CELIA | Develop 1 | L46 | NOVALAC | 1 |
| L16 | CELIA | Develop 2 | L47 | NOVALAC | 1 |
| L17 | CELIA | Expert 1 | L48 | NOVALAC | 2 |
| L18 | CELIA | Expert 2 | L49 | NOVALAC | Transit+ 1 |
| L19 | CELIA | Digest | L50 | NOVALAC | Transit+ 2 |
| L20 | CELIA | Digest | L51 | NOVALAC | AC 1 |
| L21 | CELIA | AD | L52 | NOVALAC | AC 2 |
| L22 | BIOMIL | Pré | L53 | PRIMALAC | Premium 1 |
| L23 | BIOMIL | 1 | L54 | PRIMALAC | Premium 2 |
| L24 | BIOMIL | 1 | L55 | PRIMALAC | 1 |
| L25 | BIOMIL | 2 | L56 | PRIMALAC | 2 |
| L26 | BIOMIL | 2 | L57 | PRIMALAC | LF |
| L27 | BIOMIL | Plus 1 | L58 | PRIMALAC | Digest AC |
| L28 | BIOMIL | LF | L59 | GUIGOZ | 1 |
| L29 | BIOMIL | CF | L60 | GUIGOZ | 2 |
| L30 | BIOMIL | SOY | L61 | MODILAC | Riz |
| L31 | BIOMIL | SOY | | | |

ANNEXE 5. Fiches de prélèvement des eaux**Eau du robinet**

| Code | Date Du Prélèvement | Heure | Commune | Adresse | Quantité (L) |
|-------------|----------------------------|--------------|----------------|----------------|---------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Fiche de prélèvement**Eau en bouteille**

| Code | Date | Heure | Marque | Type | N° lot | Date de fabrication. & date de pér. | Lieu d'échantillonnage | Poids (g) |
|-------------|-------------|--------------|---------------|-------------|---------------|------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

ANNEXE 6. Identification des échantillons d'eaux

Eaux en bouteille

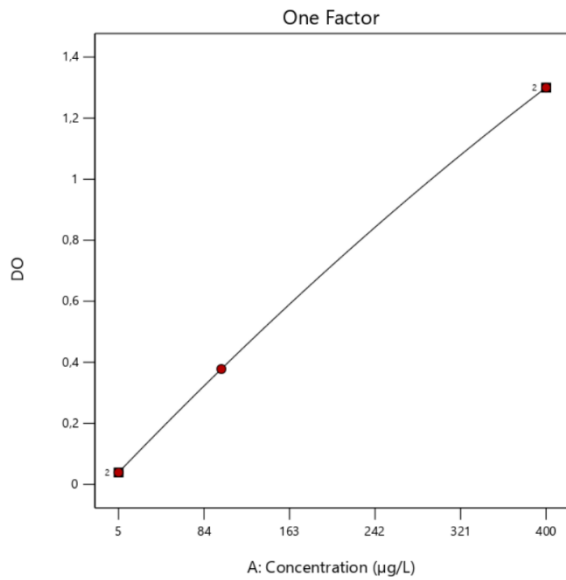
| Code | Marque | Nature | Région | Date de fabrication | Date de péremption | N° lot |
|------|----------------|----------|------------------|---------------------|--------------------|--------|
| E 01 | Ifri | Minérale | Bejaïa | 12/10/2024 | 12/10/2025 | A09 |
| E 02 | Manbaâ Ghizlan | Minérale | Beskra | 08/2024 | 08/2025 | 25CS |
| E 03 | Messäd | Source | Djelfa | 25/09/2024 | 25/09/2025 | A220 |
| E 04 | Tnoukla | Source | Tébessa | 11/05/2024 | 09/05/2025 | 131 |
| E 05 | Mansourah | Minérale | Tlemcen | 14/03/2024 | 14/03/2025 | 074A |
| E 06 | Medjana | Source | Bordj Bouariridj | 28/09/2024 | 28/09/2025 | 0342 |
| E 07 | Soummam | Source | Bejaïa | 18/03/2024 | 17/03/2025 | 078 |
| E 08 | Aïn Bouglez | Source | El Taref | 02/10/2024 | 02/10/2025 | 0276 |
| E 09 | Ayris | Source | Bejaïa | 15/09/2024 | 15/09/2025 | 259 |
| E 10 | Guedila | Minérale | Beskra | 10/2024 | 10/2025 | 1/279 |
| E 11 | Noua | Source | Khenchla | 29/08/2024 | 29/08/2025 | 242 |
| E 12 | Ouwis | Source | Bordj Bouariridj | 18/09/2024 | 18/09/2025 | 262 |
| E 13 | Lalla Khedidja | Minérale | Tizi Ouzou | 30/09/2024 | 30/09/2025 | 24CB2 |
| E 14 | Djemorah | Source | Beskra | 12/09/2024 | 12/09/2025 | 278 |
| E 15 | Ariaf | Source | Bejaïa | 24/08/2024 | 23/08/2025 | 237 |
| E 16 | Messerghine | Minérale | Oran | 11/10/2024 | 13/10/2025 | 529A |
| E 17 | Aurès | Source | Beskra | 08/04/2024 | 08/04/2025 | 098 |
| E 18 | Atlas | Source | Djelfa | 13/10/2024 | 13/10/2025 | 001 |
| E 19 | Guerioune | Source | OumBouaki | 21/03/2024 | 20/03/2025 | 0080 |
| E 20 | Säida | Minérale | Säida | 15/09/2024 | 14/09/2025 | 259/L |
| E 21 | Ovital | Source | Bejaïa | 28/05/2024 | 27/05/2025 | 149B |
| E 22 | Baniane | Minérale | Beskra | 03/07/2024 | 09/07/2025 | 184 |
| E 23 | Nestlé | Source | Blida | 19/06/2024 | 18/06/2025 | 170C |
| E 24 | Thevest | Minérale | Tebessa | 18/06/2024 | 18/06/2025 | 18 |
| E 25 | Toudja | Source | Bejaïa | 21/06/2024 | 20/06/2025 | 3741 B |
| E 26 | Quniaa | Source | Bejaïa | 08/06/2024 | 07/06/2025 | 159 |
| E 27 | El Kantra | Source | Beskra | 30/06/2024 | 29/06/2025 | 060429 |
| E 28 | Youkous | Minérale | Tebessa | 22/06/2024 | 22/06/2025 | 173 L1 |
| E 29 | Batna | Minérale | Batna | 30/06/2024 | 30/06/2025 | 181 |
| E 30 | El Ghadir | Source | Bordj Bouariridj | 18/05/2024 | 17/05/2025 | 3851 |
| E 31 | Djurdjura | Source | Bouira | 04/07/2024 | 03/07/2025 | 185 |
| E 32 | Mouzaia | Minérale | Blida | 21/06/2024 | 20/06/2025 | 99 |
| E 33 | Besbassa | Source | Guelma | 06/07/2024 | 06/07/2025 | A 02 |
| E 34 | Mileza | Source | Bordj Bouariridj | 05/07/2024 | 05/07/2025 | 152 |
| E 35 | El Djazia | Source | Batna | 07/06/2024 | 06/06/2025 | 07 |
| E 36 | Arwa | Source | Sétif | 20/06/2024 | 20/06/2025 | 171 |

Identification des échantillons d'eau du robinet

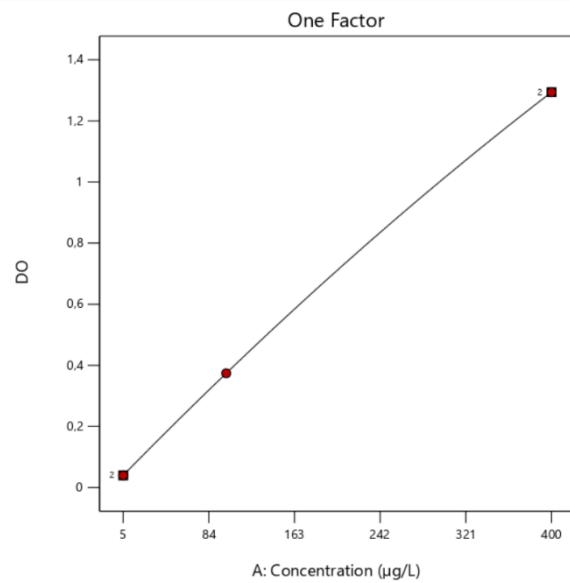
| Commune | Nombre de prélèvements | Code(s) |
|---------------------|-------------------------------|------------------|
| Annaba | 06 | R 01 à R 06 |
| El Bouni | 05 | R 07 à R 11 |
| Sidi Amar | 03 | R 12 à R 14 |
| El Hadjar | 03 | R 15 à R 17 |
| Ain El Berda | 02 | R 18, R 19 |
| El Eulma | 01 | R 20 |
| Cheurfa | 01 | R 21 |
| Berrahal | 02 | R 22, R 23 |
| Seraïdi | 03 | R 24, R 25, R 26 |
| Treat | 01 | R 27 |
| Oued El Aneb | 01 | R 28 |
| Chetaibi | 02 | R 29, R 30 |

ANNEXE 7. Courbes d'étalonnage et équations de calculs (Aluminium)

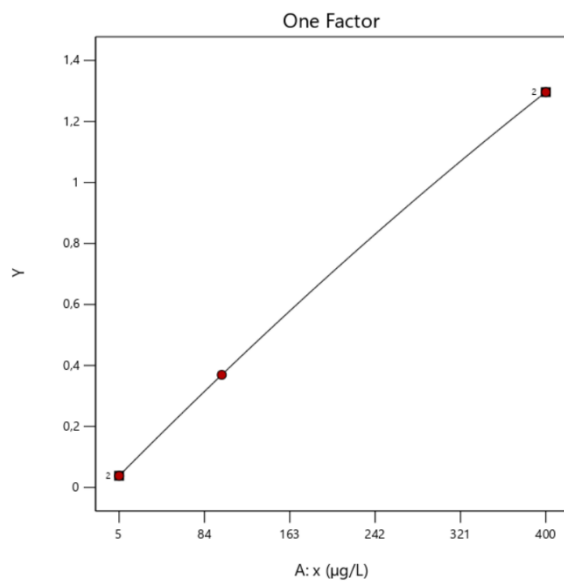
JOUR 01



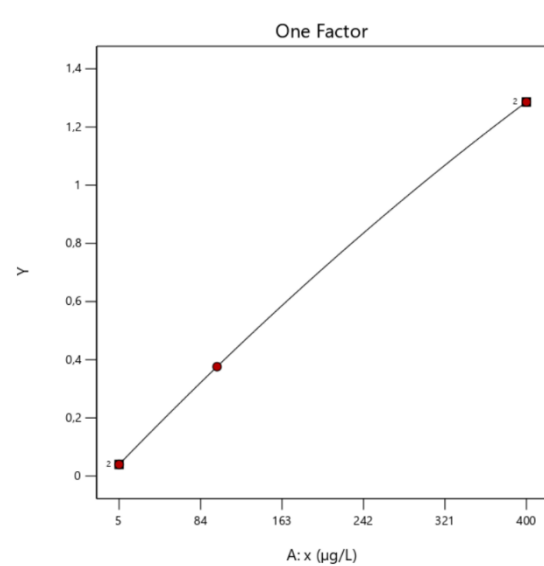
JOUR 02



JOUR 3



JOUR 04

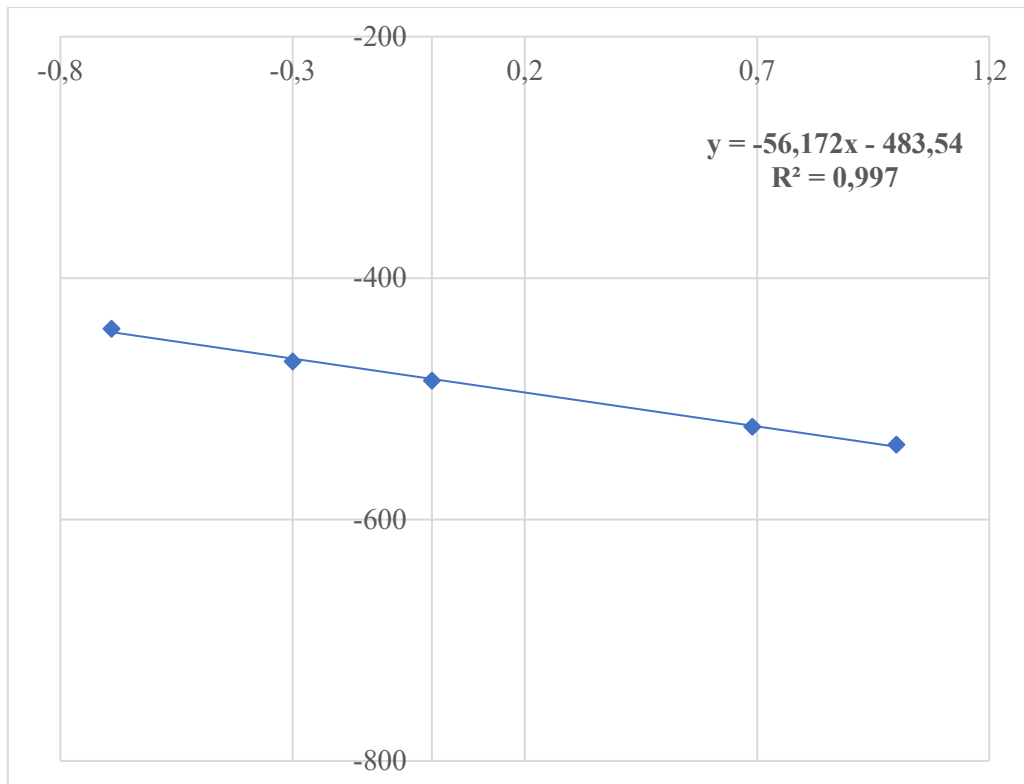


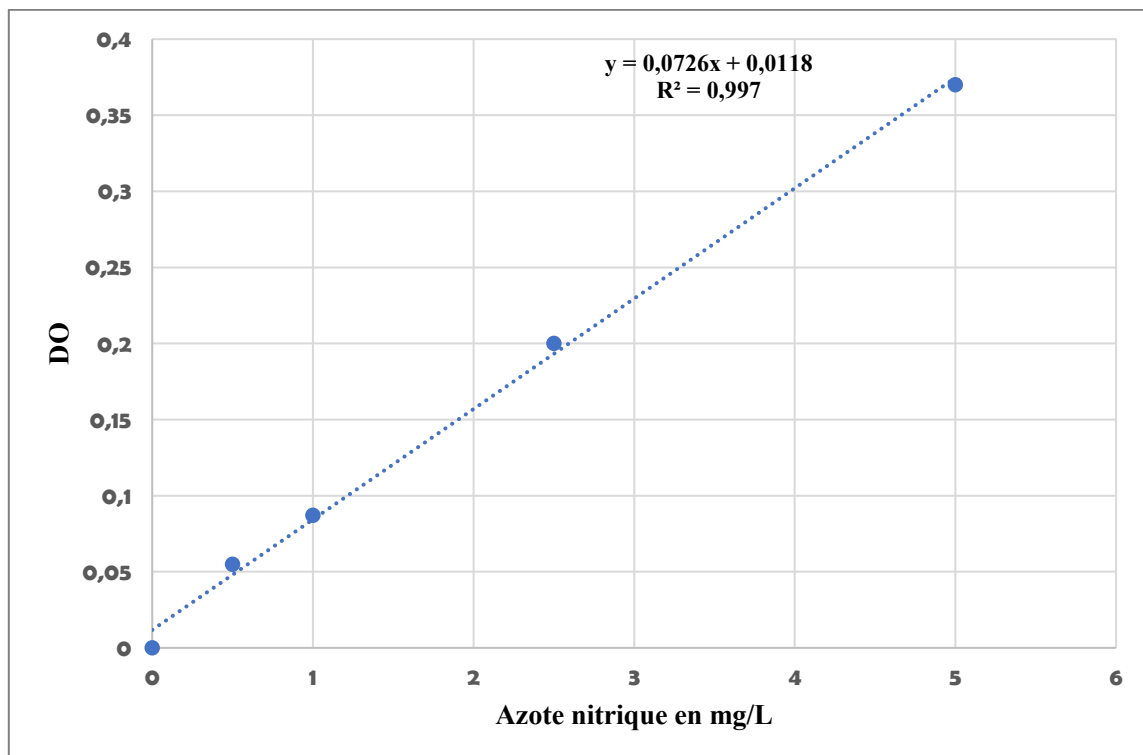
JOUR 01 : $y=0,020531+0,003700\times x-1,25339\times 10^{-6}\times x^2$

JOUR 02 : $y=0,021853+0,003635\times x-1,13702\times 10^{-6}\times x^2$

JOUR 03 : $y=0,020080+0,003589\times x-9,98001\times 10^{-7}\times x^2$

JOUR 04 : $y=0,021678+0,003671\times x-1,27471\times 10^{-6}\times x^2$

ANNEXE 08. Courbe d'étalonnage des ions fluorures

ANNEXE 09. Courbe d'étalonnage des ions nitrates

ANNEXE 10. DHI d'aluminium à partir de l'eau chez les nourrissons

Garçons (bleu) et filles (rose)

| Code | E 01 | E 02 | E 03 | E 04 | E 05 | E 06 | E 07 | E 08 | E 09 | E 10 | E 11 | E 12 | E 13 | E 14 | E 15 | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|---------|-------------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|---------|
| Marque | Ifri | Manbaâ | Ghi: Messâd | Thoukla | Mansourah | Medjana | Soummam | Aïn Bouglez | Ayris | Guedila | Noua | Ouwis | Ouwis | Djemorah | Ariaf | |
| Nature | Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aluminium | 25,000 | 109,840 | 202,030 | 196,090 | 207,030 | 184,380 | 179,140 | 221,090 | 397,660 | 347,660 | 0,000 | 121,650 | 0,000 | 135,940 | 151,560 | |
| Naissance à | 21,000 | 92,266 | 169,705 | 164,716 | 173,905 | 154,879 | 150,478 | 185,716 | 334,034 | 292,034 | 0,000 | 102,186 | 0,000 | 114,190 | 127,310 | |
| 1 mois | 21,000 | 92,266 | 169,705 | 164,716 | 173,905 | 154,879 | 150,478 | 185,716 | 334,034 | 292,034 | 0,000 | 102,186 | 0,000 | 114,190 | 127,310 | |
| 2 mois | 22,500 | 98,856 | 181,827 | 176,481 | 186,327 | 165,942 | 161,226 | 198,981 | 357,894 | 312,894 | 0,000 | 109,485 | 0,000 | 122,346 | 136,404 | |
| 3 mois | 24,609 | 108,124 | 198,873 | 193,026 | 203,795 | 181,499 | 176,341 | 217,635 | 391,447 | 342,228 | 0,000 | 119,749 | 0,000 | 133,816 | 149,192 | |
| 4 mois | 22,500 | 98,856 | 181,827 | 176,481 | 186,327 | 165,942 | 161,226 | 198,981 | 357,894 | 312,894 | 0,000 | 109,485 | 0,000 | 122,346 | 136,404 | |
| 5 mois | 19,600 | 86,115 | 158,392 | 153,735 | 162,312 | 144,554 | 140,446 | 173,335 | 311,765 | 272,565 | 0,000 | 95,374 | 0,000 | 106,577 | 118,823 | |
| 6 mois | 18,608 | 81,754 | 150,372 | 145,951 | 154,093 | 137,235 | 133,335 | 164,558 | 295,980 | 258,765 | 0,000 | 90,545 | 0,000 | 101,181 | 112,807 | |
| 7 mois | 13,283 | 58,361 | 107,344 | 104,188 | 110,000 | 97,966 | 95,182 | 117,471 | 211,287 | 184,721 | 0,000 | 64,636 | 0,000 | 72,228 | 80,528 | |
| 8 mois | 12,820 | 56,325 | 103,599 | 100,553 | 106,163 | 94,548 | 91,861 | 113,373 | 203,916 | 178,277 | 0,000 | 62,381 | 0,000 | 69,709 | 77,719 | |
| 9 mois | 12,388 | 54,426 | 100,107 | 97,164 | 102,585 | 91,361 | 88,765 | 109,551 | 197,043 | 172,267 | 0,000 | 60,278 | 0,000 | 67,359 | 75,099 | |
| 10 mois | 11,984 | 52,652 | 96,843 | 93,995 | 99,239 | 88,382 | 85,870 | 105,979 | 190,617 | 166,650 | 0,000 | 58,313 | 0,000 | 65,163 | 72,650 | |
| 11 mois | 11,729 | 51,531 | 94,782 | 91,995 | 97,128 | 86,502 | 84,043 | 103,724 | 186,562 | 163,104 | 0,000 | 57,072 | 0,000 | 63,776 | 71,104 | |
| 12 mois | 11,484 | 50,458 | 92,808 | 90,079 | 95,104 | 84,700 | 82,292 | 101,563 | 182,675 | 159,706 | 0,000 | 55,883 | 0,000 | 62,447 | 69,623 | |
| E 16 | E 17 | E 18 | E 19 | E 20 | E 21 | E 22 | E 23 | E 24 | E 25 | E 26 | E 27 | E 28 | E 29 | E 30 | E 31 | E 32 |
| Messerghin | Aurès | Atlas | Guerioune | Saïda | Ovital | Baniane | Nestlé | Thevest | Toudja | Quinia | El Kantra | Yonkous | Batna | El Ghadir | Djurdjura | Mouzaïa |
| Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille Eau en bouteille | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 190,630 | 166,410 | 256,230 | 152,340 | 99,220 | 14,060 | 128,700 | 0,000 | 84,380 | 48,440 | 135,940 | 149,220 | 8,650 | 86,130 | 135,470 | 169,880 | 636,250 |
| 160,129 | 139,784 | 215,233 | 127,966 | 83,345 | 11,810 | 108,108 | 0,000 | 70,879 | 40,690 | 114,190 | 125,345 | 7,266 | 72,349 | 113,795 | 142,699 | 534,450 |
| 160,129 | 139,784 | 215,233 | 127,966 | 83,345 | 11,810 | 108,108 | 0,000 | 70,879 | 40,690 | 114,190 | 125,345 | 7,266 | 72,349 | 113,795 | 142,699 | 534,450 |
| 171,567 | 149,769 | 230,607 | 137,106 | 89,298 | 12,654 | 115,830 | 0,000 | 75,942 | 43,596 | 122,346 | 134,298 | 7,785 | 77,517 | 121,923 | 152,892 | 572,625 |
| 187,651 | 163,810 | 252,226 | 149,960 | 97,670 | 13,840 | 126,689 | 0,000 | 83,062 | 47,683 | 133,816 | 146,888 | 8,515 | 84,784 | 133,353 | 167,226 | 626,309 |
| 171,567 | 149,769 | 230,607 | 137,106 | 89,298 | 12,654 | 115,830 | 0,000 | 75,942 | 43,596 | 122,346 | 134,298 | 7,785 | 77,517 | 121,923 | 152,892 | 572,625 |
| 149,454 | 130,465 | 200,884 | 119,435 | 77,788 | 11,023 | 100,901 | 0,000 | 66,154 | 37,977 | 106,577 | 116,988 | 6,782 | 67,526 | 106,208 | 133,186 | 498,820 |
| 141,887 | 123,860 | 190,713 | 113,387 | 73,850 | 10,465 | 95,792 | 0,000 | 62,804 | 36,054 | 101,181 | 111,065 | 6,438 | 64,107 | 100,831 | 126,442 | 473,563 |
| 101,287 | 88,418 | 136,141 | 80,942 | 52,718 | 7,470 | 68,382 | 0,000 | 44,833 | 25,737 | 72,228 | 79,284 | 4,596 | 45,763 | 71,979 | 90,262 | 338,056 |
| 97,753 | 85,334 | 131,392 | 78,119 | 50,879 | 7,210 | 65,996 | 0,000 | 43,269 | 24,840 | 69,709 | 76,519 | 4,436 | 44,167 | 69,468 | 87,113 | 326,263 |
| 94,458 | 82,457 | 126,963 | 75,485 | 49,164 | 6,967 | 63,772 | 0,000 | 41,811 | 24,002 | 67,359 | 73,939 | 4,286 | 42,678 | 67,126 | 84,176 | 315,265 |
| 91,378 | 79,768 | 122,823 | 73,024 | 47,561 | 6,740 | 61,692 | 0,000 | 40,447 | 23,220 | 65,163 | 71,528 | 4,146 | 41,286 | 64,937 | 81,432 | 304,985 |
| 89,434 | 78,071 | 120,210 | 71,470 | 46,549 | 6,596 | 60,379 | 0,000 | 39,587 | 22,726 | 63,776 | 70,006 | 4,058 | 40,408 | 63,556 | 79,699 | 298,496 |
| 87,571 | 76,445 | 117,706 | 69,981 | 45,579 | 6,459 | 59,122 | 0,000 | 38,762 | 22,252 | 62,447 | 68,548 | 3,974 | 39,566 | 62,232 | 78,039 | 292,277 |
| E 33 | E 34 | E 35 | E 36 | R 01 | R 02 | R 03 | R 04 | R 05 | R 06 | R 07 | R 08 | R 09 | R 10 | R 11 | R 12 | R 13 |
| Besbassa | Mileza | El Djazia | Arwa | Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet | | | | | | | | | | | | |
| 78,910 | 131,250 | 100,020 | 87,540 | 80,470 | 149,220 | 82,520 | 83,160 | 84,470 | 275,240 | 145,310 | 116,440 | 92,870 | 107,580 | 120,600 | 79,690 | 81,230 |
| 66,284 | 110,250 | 84,017 | 73,534 | 67,595 | 125,345 | 69,317 | 69,854 | 70,955 | 231,202 | 122,060 | 97,810 | 78,011 | 90,367 | 101,304 | 66,940 | 68,233 |
| 66,284 | 110,250 | 84,017 | 73,534 | 67,595 | 125,345 | 69,317 | 69,854 | 70,955 | 231,202 | 122,060 | 97,810 | 78,011 | 90,367 | 101,304 | 66,940 | 68,233 |
| 71,019 | 118,125 | 90,018 | 78,786 | 72,423 | 134,298 | 74,268 | 74,844 | 76,023 | 247,716 | 130,779 | 104,796 | 83,583 | 96,822 | 108,540 | 71,721 | 73,107 |
| 77,677 | 129,199 | 98,457 | 86,172 | 79,213 | 146,888 | 81,231 | 81,861 | 83,150 | 270,939 | 143,040 | 114,621 | 91,419 | 105,899 | 118,716 | 78,445 | 79,961 |
| 71,019 | 118,125 | 90,018 | 78,786 | 72,423 | 134,298 | 74,268 | 74,844 | 76,023 | 247,716 | 130,779 | 104,796 | 83,583 | 96,822 | 108,540 | 71,721 | 73,107 |
| 61,865 | 102,900 | 78,416 | 68,631 | 63,088 | 116,988 | 64,696 | 65,197 | 66,224 | 215,788 | 113,923 | 91,289 | 72,810 | 84,343 | 94,550 | 62,477 | 63,684 |
| 58,733 | 97,690 | 74,445 | 65,156 | 59,894 | 111,065 | 61,420 | 61,896 | 62,871 | 204,862 | 108,155 | 86,667 | 69,123 | 80,072 | 89,763 | 59,314 | 60,460 |
| 41,927 | 69,736 | 53,143 | 46,512 | 42,756 | 79,284 | 43,845 | 44,185 | 44,881 | 146,242 | 77,207 | 61,868 | 49,344 | 57,160 | 64,078 | 42,341 | 43,160 |
| 40,464 | 67,304 | 51,289 | 44,890 | 41,264 | 76,519 | 42,315 | 42,644 | 43,315 | 141,141 | 74,514 | 59,709 | 47,623 | 55,166 | 61,843 | 40,864 | 41,654 |
| 39,100 | 65,035 | 49,560 | 43,377 | 39,873 | 73,939 | 40,889 | 41,206 | 41,855 | 136,383 | 72,002 | 57,697 | 46,018 | 53,306 | 59,758 | 39,487 | 40,250 |
| 37,825 | 62,914 | 47,944 | 41,962 | 38,573 | 71,528 | 39,556 | 39,863 | 40,491 | 131,936 | 69,654 | 55,815 | 44,517 | 51,568 | 57,809 | 38,199 | 38,937 |
| 37,021 | 61,576 | 46,924 | 41,069 | 37,752 | 70,006 | 38,714 | 39,014 | 39,629 | 129,129 | 68,172 | 54,628 | 43,570 | 50,471 | 56,579 | 37,386 | 38,109 |
| 36,249 | 60,293 | 45,947 | 40,214 | 36,966 | 68,548 | 37,908 | 38,202 | 38,803 | 126,438 | 66,752 | 53,490 | 42,662 | 49,420 | 55,401 | 36,608 | 37,315 |
| R 14 | R 15 | R 16 | R 17 | R 18 | R 19 | R 20 | R 21 | R 22 | R 23 | R 24 | R 25 | R 26 | R 27 | R 28 | R 29 | R 30 |
| Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet Eau du robinet | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 76,330 | 208,040 | 198,450 | 125,870 | 75,420 | 85,140 | 92,470 | 81,410 | 78,910 | 86,500 | 12,450 | 150,780 | 0,000 | 17,540 | 28,910 | 63,280 | 86,920 |
| 64,117 | 174,754 | 166,698 | 105,731 | 63,353 | 71,518 | 77,675 | 68,384 | 66,284 | 72,660 | 10,458 | 126,655 | 0,000 | 14,734 | 24,284 | 53,155 | 73,013 |
| 64,117 | 174,754 | 166,698 | 105,731 | 63,353 | 71,518 | 77,675 | 68,384 | 66,284 | 72,660 | 10,458 | 126,655 | 0,000 | 14,734 | 24,284 | 53,155 | 73,013 |
| 68,697 | 187,236 | 178,605 | 113,283 | 67,878 | 76,626 | 83,223 | 73,269 | 71,019 | 77,850 | 11,205 | 135,702 | 0,000 | 15,786 | 26,019 | 56,952 | 78,228 |
| 75,137 | 204,789 | 195,349 | 123,903 | 74,242 | 83,810 | 91,025 | 80,138 | 77,677 | 85,148 | 12,255 | 148,424 | 0,000 | 17,266 | 28,458 | 62,291 | 85,562 |
| 68,697 | 187,236 | 178,605 | 113,283 | 67,878 | 76,626 | 83,223 | 73,269 | 71,019 | 77,850 | 11,205 | 135,702 | 0,000 | 15,786 | 26,019 | 56,952 | 78,228 |
| 59,843 | 163,103 | 155,585 | 98,682 | 59,129 | 66,750 | 72,496 | 63,825 | 61,865 | 67,816 | 9,761 | 118,212 | 0,000 | 13,751 | 22,665 | 49,612 | 68,145 |
| 56,813 | 154,845 | 147,707 | 93,686 | 56,135 | 63,370 | 68,826 | 60,594 | 58,733 | 64,382 | 9,267 | 112,226 | 0,000 | 13,055 | 21,518 | 47,100 | 64,695 |
| 40,556 | 110,537 | 105,442 | 66,878 | 40,073 | 45,237 | 49,132 | 43,255 | 41,927 | 45,960 | 6,615 | 80,113 | 0,000 | 9,319 | 15,361 | 33,622 | 46,183 |
| 39,141 | 106,681 | 101,763 | 64,545 | 38,675 | 43,659 | 47,418 | 41,746 | 40,464 | 44,356 | 6,384 | 77,319 | 0,000 | 8,994 | 14,825 | 32,449 | |

| Code | E 01 | E 02 | E 03 | E 04 | E 05 | E 06 | E 07 | E 08 | E 09 | E 10 | E 11 | E 12 | E 13 | E 14 | E 15 |
|-------------|------------------|---------|-------------|---------|-----------|---------|---------|-------------|---------|---------|-------|---------|-------|----------|---------|
| Marque | Ifri | Manbaâ | Ghi: Messâd | Tnoukla | Mansourah | Medjana | Soummam | Ain Bouglez | Ayris | Guedila | Noua | Ouwis | Ouwis | Djemorah | Ariaf |
| Nature | Eau en bouteille | | | | | | | | | | | | | | |
| Aluminium | 25 | | | | | | | | | | | | | | |
| Naissance à | 22,273 | 97,857 | 179,990 | 174,698 | 184,445 | 164,266 | 159,597 | 196,971 | 354,279 | 309,733 | 0,000 | 108,379 | 0,000 | 121,110 | 135,026 |
| 1 mois | 22,500 | 98,856 | 181,827 | 176,481 | 186,327 | 165,942 | 161,226 | 198,981 | 357,894 | 312,894 | 0,000 | 109,485 | 0,000 | 122,346 | 136,404 |
| 2 mois | 24,706 | 108,548 | 199,653 | 193,783 | 204,594 | 182,211 | 177,032 | 218,489 | 392,982 | 343,570 | 0,000 | 120,219 | 0,000 | 134,341 | 149,777 |
| 3 mois | 27,155 | 119,309 | 219,446 | 212,994 | 224,877 | 200,275 | 194,583 | 240,149 | 431,941 | 377,631 | 0,000 | 132,137 | 0,000 | 147,659 | 164,626 |
| 4 mois | 24,609 | 108,124 | 198,873 | 193,026 | 203,795 | 181,499 | 176,341 | 217,635 | 391,447 | 342,228 | 0,000 | 119,749 | 0,000 | 133,816 | 149,192 |
| 5 mois | 22,273 | 97,857 | 179,990 | 174,698 | 184,445 | 164,266 | 159,597 | 196,971 | 354,279 | 309,733 | 0,000 | 108,379 | 0,000 | 121,110 | 135,026 |
| 6 mois | 20,137 | 88,474 | 162,731 | 157,946 | 166,758 | 148,514 | 144,294 | 178,083 | 320,307 | 280,033 | 0,000 | 97,987 | 0,000 | 109,497 | 122,078 |
| 7 mois | 14,507 | 63,736 | 117,231 | 113,784 | 120,132 | 106,989 | 103,948 | 128,290 | 230,747 | 201,734 | 0,000 | 70,589 | 0,000 | 78,881 | 87,945 |
| 8 mois | 13,956 | 61,316 | 112,779 | 109,463 | 115,570 | 102,926 | 100,001 | 123,419 | 221,985 | 194,073 | 0,000 | 67,908 | 0,000 | 75,885 | 84,605 |
| 9 mois | 13,445 | 59,072 | 108,653 | 105,458 | 111,342 | 99,160 | 96,342 | 118,903 | 213,863 | 186,973 | 0,000 | 65,424 | 0,000 | 73,109 | 81,510 |
| 10 mois | 12,971 | 56,988 | 104,818 | 101,736 | 107,412 | 95,661 | 92,942 | 114,707 | 206,315 | 180,374 | 0,000 | 63,115 | 0,000 | 70,529 | 78,633 |
| 11 mois | 12,672 | 55,678 | 102,408 | 99,397 | 104,943 | 93,462 | 90,805 | 112,070 | 201,572 | 176,228 | 0,000 | 61,664 | 0,000 | 68,908 | 76,825 |
| 12 mois | 12,388 | 54,426 | 100,107 | 97,164 | 102,585 | 91,361 | 88,765 | 109,551 | 197,043 | 172,267 | 0,000 | 60,278 | 0,000 | 67,359 | 75,099 |

| E 16 | E 17 | E 18 | E 19 | E 20 | E 21 | E 22 | E 23 | E 24 | E 25 | E 26 | E 27 | E 28 | E 29 | E 30 | E 31 | E 32 |
|------------------|---------|---------|----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|-----------|---------|--------|-----------|-----------|---------|
| Messergheim | Aurès | Atlas | Gueroime | Saïda | Ovital | Baniane | Nestlé | Thevest | Toudja | Quinaa | El Kantra | Youkous | Batna | El Ghadir | Djurdjura | Mouzaïa |
| Eau en bouteille | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 190,63 | 166,41 | 256,23 | 152,34 | 99,22 | 14,06 | 128,7 | 0 | 84,38 | 48,44 | 135,94 | 149,22 | 8,65 | 86,13 | 135,47 | 169,88 | 636,25 |
| 169,834 | 148,256 | 228,278 | 135,721 | 88,396 | 12,526 | 114,660 | 0,000 | 75,175 | 43,156 | 121,110 | 132,941 | 7,706 | 76,734 | 120,691 | 151,348 | 566,841 |
| 171,567 | 149,769 | 230,607 | 137,106 | 89,298 | 12,654 | 115,830 | 0,000 | 75,942 | 43,596 | 122,346 | 134,298 | 7,785 | 77,517 | 121,923 | 152,892 | 572,625 |
| 188,387 | 164,452 | 253,216 | 150,548 | 98,053 | 13,895 | 127,186 | 0,000 | 83,387 | 47,870 | 134,341 | 147,464 | 8,548 | 85,117 | 133,876 | 167,881 | 628,765 |
| 207,064 | 180,756 | 278,319 | 165,473 | 107,773 | 15,272 | 139,795 | 0,000 | 91,654 | 52,616 | 147,659 | 162,084 | 9,396 | 93,555 | 147,148 | 184,525 | 691,099 |
| 187,651 | 163,810 | 252,226 | 149,960 | 97,670 | 13,840 | 126,689 | 0,000 | 83,062 | 47,683 | 133,816 | 146,888 | 8,515 | 84,784 | 133,353 | 167,226 | 626,309 |
| 169,834 | 148,256 | 228,278 | 135,721 | 88,396 | 12,526 | 114,660 | 0,000 | 75,175 | 43,156 | 121,110 | 132,941 | 7,706 | 76,734 | 120,691 | 151,348 | 566,841 |
| 153,549 | 134,040 | 206,388 | 122,707 | 79,920 | 11,325 | 103,665 | 0,000 | 67,966 | 39,017 | 109,497 | 120,194 | 6,967 | 69,376 | 109,118 | 136,835 | 512,486 |
| 110,616 | 96,562 | 148,681 | 88,397 | 57,574 | 8,159 | 74,680 | 0,000 | 48,963 | 28,108 | 78,881 | 86,587 | 5,019 | 49,978 | 78,608 | 98,575 | 369,192 |
| 106,415 | 92,895 | 143,035 | 85,040 | 55,387 | 7,849 | 71,844 | 0,000 | 47,103 | 27,041 | 75,885 | 83,299 | 4,829 | 48,080 | 75,623 | 94,832 | 355,172 |
| 102,522 | 89,496 | 137,802 | 81,929 | 53,361 | 7,562 | 69,215 | 0,000 | 45,380 | 26,051 | 73,109 | 80,251 | 4,652 | 46,321 | 72,856 | 91,362 | 342,178 |
| 98,903 | 86,337 | 132,938 | 79,038 | 51,478 | 7,295 | 66,773 | 0,000 | 43,778 | 25,132 | 70,529 | 77,419 | 4,488 | 44,686 | 70,285 | 88,138 | 330,101 |
| 96,630 | 84,353 | 129,882 | 77,221 | 50,294 | 7,127 | 65,238 | 0,000 | 42,772 | 24,554 | 68,908 | 75,639 | 4,385 | 43,659 | 68,669 | 86,112 | 322,513 |
| 94,458 | 82,457 | 126,963 | 75,485 | 49,164 | 6,967 | 63,772 | 0,000 | 41,811 | 24,002 | 67,359 | 73,939 | 4,286 | 42,678 | 67,126 | 84,176 | 315,265 |

| E 33 | E 34 | E 35 | E 36 | R 01 | R 02 | R 03 | R 04 | R 05 | R 06 | R 07 | R 08 | R 09 | R 10 | R 11 | R 12 | R 13 | R 14 | R 15 |
|----------|---------|-----------|--------|----------------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|
| Besbassa | Mileza | El Djazia | Arwa | Eau du robinet | | | | | | | | | | | | | | |
| 78,91 | 131,25 | 100,02 | 87,54 | 80,47 | 149,22 | 82,52 | 83,16 | 84,47 | 275,24 | 145,31 | 116,44 | 92,87 | 107,58 | 120,6 | 79,69 | 81,23 | 76,33 | 208,04 |
| 70,302 | 116,932 | 89,109 | 77,990 | 71,691 | 132,941 | 73,518 | 74,088 | 75,255 | 245,214 | 129,458 | 103,737 | 82,739 | 95,844 | 107,444 | 70,997 | 72,369 | 68,003 | 185,345 |
| 71,019 | 118,125 | 90,018 | 78,786 | 72,423 | 134,298 | 74,268 | 74,844 | 76,023 | 247,716 | 130,779 | 104,796 | 83,583 | 96,822 | 108,540 | 71,721 | 73,107 | 68,697 | 187,236 |
| 77,982 | 129,706 | 98,843 | 86,510 | 79,523 | 147,464 | 81,549 | 82,182 | 83,476 | 272,002 | 143,600 | 115,070 | 91,777 | 106,314 | 119,181 | 78,752 | 80,274 | 75,432 | 205,592 |
| 85,713 | 142,565 | 108,642 | 95,087 | 87,407 | 162,084 | 89,634 | 90,329 | 91,752 | 298,968 | 157,837 | 126,478 | 100,876 | 116,854 | 130,997 | 86,560 | 88,233 | 82,910 | 225,974 |
| 77,677 | 129,199 | 98,457 | 86,172 | 79,213 | 146,888 | 81,231 | 81,861 | 83,150 | 270,939 | 143,400 | 114,621 | 91,419 | 105,899 | 118,716 | 78,445 | 79,961 | 75,137 | 204,789 |
| 70,302 | 116,932 | 89,109 | 77,990 | 71,691 | 132,941 | 73,518 | 74,088 | 75,255 | 245,214 | 129,458 | 103,737 | 82,739 | 95,844 | 107,444 | 70,997 | 72,369 | 68,003 | 185,345 |
| 63,560 | 105,719 | 80,564 | 70,512 | 64,817 | 120,194 | 66,468 | 66,984 | 68,039 | 221,700 | 117,044 | 93,790 | 74,805 | 86,653 | 97,141 | 64,189 | 65,429 | 61,482 | 167,572 |
| 45,789 | 76,160 | 58,038 | 50,796 | 46,694 | 86,587 | 47,883 | 48,255 | 49,015 | 159,712 | 84,318 | 67,566 | 53,889 | 62,425 | 69,980 | 46,241 | 47,135 | 44,291 | 120,718 |
| 44,050 | 73,267 | 55,834 | 48,867 | 44,921 | 83,299 | 46,065 | 46,422 | 47,154 | 153,647 | 81,116 | 65,000 | 51,843 | 60,054 | 67,322 | 44,485 | 45,345 | 42,610 | 116,134 |
| 42,438 | 70,587 | 53,791 | 47,079 | 43,277 | 80,251 | 44,380 | 44,724 | 45,428 | 148,025 | 78,148 | 62,622 | 49,946 | 57,857 | 64,859 | 42,858 | 43,686 | 41,051 | 111,885 |
| 40,940 | 68,096 | 51,893 | 45,418 | 41,750 | 77,419 | 42,813 | 43,145 | 43,825 | 142,801 | 75,390 | 60,412 | 48,183 | 55,815 | 62,570 | 41,345 | 42,144 | 39,602 | 107,936 |
| 39,999 | 66,530 | 50,700 | 44,374 | 40,790 | 75,639 | 41,829 | 42,154 | 42,818 | 139,518 | 73,657 | 59,023 | 47,075 | 54,532 | 61,132 | 40,395 | 41,175 | 38,691 | 105,455 |
| 39,100 | 65,035 | 49,560 | 43,377 | 39,873 | 73,939 | 40,889 | 41,206 | 41,855 | 136,383 | 72,002 | 57,697 | 46,018 | 53,306 | 59,758 | 39,487 | 40,250 | 37,822 | 103,085 |

| R 16 | R 17 | R 18 | R 19 | R 20 | R 21 | R 22 | R 23 | R 24 | R 25 | R 26 | R 27 | R 28 | R 29 | R 30 |
|----------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Eau du robinet | | | | | | | | | | | | | | |
| 198,45 | 125,87 | 75,42 | 85,14 | 92,47 | 81,41 | 78,91 | 86,5 | 12,45 | 150,78 | 0 | 17,54 | 28,91 | 63,28 | 86,92 |
| 176,801 | 112,139 | 67,192 | 75,852 | 82,382 | 72,529 | 70,302 | 77,064 | 11,092 | 134,331 | 0,000 | 15,627 | 25,756 | 56,377 | 77,438 |
| 178,605 | 113,283 | 67,878 | 76,626 | 83,223 | 73,269 | 71,019 | 77,850 | 11,205 | 135,702 | 0,000 | 15,786 | 26,019 | 56,952 | 78,228 |
| 196,115 | 124,389 | 74,533 | 84,138 | 91,382 | 80,452 | 77,982 | 85,482 | 12,304 | 149,006 | 0,000 | 17,334 | 28,570 | 62,536 | 85,897 |
| 215,558 | 136,721 | 81,922 | 92,480 | 100,442 | 88,428 | 85,713 | 93,957 | 13,523 | 163,778 | 0,000 | 19,052 | 31,402 | 68,735 | 94,413 |
| 195,349 | 123,903 | 74,242 | 83,810 | 91,025 | 80,138 | 77,677 | 85,148 | 12,255 | 148,424 | 0,000 | 17,266 | 28,458 | 62,291 | 85,562 |
| 176,801 | 112,139 | 67,192 | 75,852 | 82,382 | 72,529 | 70,302 | 77,064 | 11,092 | 134,331 | 0,000 | 15,627 | 25,756 | 56,377 | 77,438 |
| 159,847 | 101,386 | 60,749 | 68,579 | 74,483 | 65,574 | 63,560 | 69,674 | 10,028 | 121,450 | 0,000 | 14,128 | 23,286 | 50,971 | 70,012 |
| 115,153 | 73,038 | 43,763 | 49,404 | 53,657 | 47,239 | 45,789 | 50,193 | 7,224 | 87,492 | 0,000 | 10,178 | 16,775 | 36,719 | 50,436 |
| 110,780 | 70,264 | 42,102 | 47,528 | 51,619 | 45,445 | 44,050 | 48,287 | 6,950 | 84,170 | 0,000 | 9,791 | 16,138 | 35,325 | 48,521 |
| 106,727 | 67,694 | 40,561 | 45,789 | 49,731 | 43,783 | 42,438 | 46,520 | 6,696 | 81,090 | 0,000 | 9,433 | 15,548 | 34,032 | 46,746 |
| 102,961 | 65,304 | 39,130 | 44,173 | | | | | | | | | | | |

ANNEXE 11. Réactifs utilisés en analyse des eaux

❖ Réactif pour la conductivité électrique

- Solution de KCl 0,01 M.

❖ Réactifs pour le dosage de l'aluminium dans l'eau

- Solution tampon (pH 4,5) : CH_3COONa / CH_3COOH .
- Rouge d'Alizarine S (0,18% m/v).
- Polyvinylpyrrolidone (PVP 10%).
- Polyvinylpyrrolidone (PVP 1%).
- Solution standard d'aluminium (0,1 g/L) à partir de chlorure d'aluminium.

❖ Réactifs pour le dosage du calcium et magnésium

- HCl dilué pour rincer la verrerie.
- Solution de complexon III M/100 (PM = 372 g).
- Noir Eriochrome T (NET).
- Solution tampon ammoniacal pH = 10.
- Solution de complexonate de Mg à 1 g‰ – Oxalate d'ammonium à 5 %.

❖ Réactifs pour le dosage des chlorures

- Acide nitrique pur.
- Carbonate de calcium pur.
- Solution de chromate de potassium à 10%.
- Solution de nitrate d'argent 0,1N.

❖ Réactifs pour le dosage des nitrates

- Solution de salicylate de sodium à 0.5 %, à renouveler toutes les 24 heures.
- Acide sulfurique concentré ($d=1,84$).
- Solution d'hydroxyde de sodium et de tartrate double de sodium et de potassium.
- Solution mère étalon d'azote nitrique à 0.1 g/L.
- Solution fille étalon d'azote nitrique à 0,005g/L.
- Amener 50 ml de la solution mère à 1000 mL avec de l'eau distillée.

❖ Réactifs pour le dosage des fluorures

- Hydroxyde de sodium, (NaOH) = 5 mol/l.
- Tampon pour ajuster la force ionique totale (TISAB).
- Fluorure, solution mère, 1 000 mg/l.

ANNEXE 12. Textes réglementaires

| 7 Jomada El Oula 1435 9 mars 2014 | | JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 13 | | 15 |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| ANNEXE | | | | |
| Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine | | | | |
| Tableau 1 : paramètres avec valeurs limites | | | | |
| GROUPE DE PARAMETRES | PARAMETRES | UNITES | VALEURS LIMITES | |
| Paramètres chimiques | Aluminium | mg/l | 0,2 | |
| | Ammonium | mg/l | 0,5 | |
| | Baryum | mg/l | 0,7 | |
| | Bore | mg/l | - Eaux conventionnelles : 1 - Eaux déssalées ou déminéralisées : 1,3 | |
| | Fluorures | mg/l | 1,5 | |
| | Nitrates | mg/l | 50 | |
| | Nitrites | mg/l | 0,2 | |
| | Oxydabilité | mg/l O ₂ | 5 | |
| | Acrylamide | µg/l | 0,5 | |
| | Antimoine | µg/l | 20 | |
| | Argent | µg/l | 100 | |
| | Arsenic | µg/l | 10 | |
| | Cadmium | µg/l | 3 | |
| | Chrome total | µg/l | 50 | |
| | Cuivre | mg/l | 2 | |
| | Cyanures | µg/l | 70 | |
| | Mercure | µg/l | 6 | |
| | Nickel | µg/l | 70 | |
| | Plomb | µg/l | 10 | |
| | Sélénium | µg/l | 10 | |
| | Zinc | mg/l | 5 | |
| | Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H.P.A) totaux | µg/l | 0,2 | |
| | Fluoranthène, benzo (3,4) fluoranthène, benzo (1,12) fluoranthène, benzo (3,4) pyrène, benzo (1,12) pérylène, indéno (1,2,3-cd) pyrène, benzo (3,4) pyrène | µg/l | 0,01 | |
| | Benzène | µg/l | 10 | |
| Toluène | µg/l | 700 | | |
| Ethylbenzène | µg/l | 300 | | |

ANNEXE (suite)

| GROUPE DE PARAMETRES | PARAMETRES | UNITES | VALEURS LIMITES |
|------------------------------|---------------------------------------------------|---------------|-----------------|
| Paramètres chimiques (suite) | Xylènes | µg/l | 500 |
| | Styrène | µg/l | 100 |
| | Agents de surface régissant au bleu de méthylène | mg/l | 0,2 |
| | Epychlorehydrine | µg/l | 0,4 |
| | Microcystine LR | µg/l | 1 |
| | Pesticides par substance individualisée | | |
| | - Insecticides organochlorés persistants | µg/l | 0,1 |
| | - Insecticides organophosphorés et carbamates | µg/l | 0,1 |
| | - Herbicides | µg/l | 0,1 |
| | - Fongicides | µg/l | 0,1 |
| | - P.C.B | µg/l | 0,1 |
| | - P.C.T | µg/l | 0,1 |
| | - Aldrine | µg/l | 0,03 |
| | - Dieldrine | µg/l | 0,03 |
| | - Heptachlore | µg/l | 0,03 |
| | - Heptachlorépoxyde | µg/l | 0,03 |
| | Pesticides (Totaux) | µg/l | 0,5 |
| | Bromates | µg/l | 10 |
| | Chlorite | µg/l | 0,07 |
| | Trihalométhanes par substance individualisée : | - Chloroforme | µg/l |
| - Bromoforme | | µg/l | 100 |
| - Dibromochlorométhane | | µg/l | 100 |
| - Bromodichlorométhane | | µg/l | 60 |
| Chlorure de vinyle | | µg/l | 0,3 |
| 1,2-Dichloroéthane | | µg/l | 30 |
| 1,2-Dichlorobenzène | | µg/l | 1000 |
| 1,4-Dichlorobenzène | | µg/l | 300 |
| Trichloroéthylène | | µg/l | 20 |
| Tetrachloroéthylène | | µg/l | 40 |
| Radionucléides | Particules alpha | Picocuriel/L | 15 |
| | Particules bêta | Millirems/an | 4 |
| | Tritium | Bequerel/l | 100 |
| | Uranium | µg/l | 30 |
| | Dose totale indicative (DTI) | mSv/an | 0,15 |
| paramètres microbiologiques | Escherichia Coli | n/100ml | 0 |
| | Entérocoques | n/100ml | 0 |
| | Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores | n/20ml | 0 |

Tableau 2

Paramètres avec valeurs indicatives

| GROUPE DE PARAMETRES | PARAMETRES | UNITES | VALEURS INDICATIVES |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Paramètres Organoleptiques | couleur | mg/l platine | 15 |
| | Turbidité | NTU | 5 |
| | Odeur à 25 °C | Taux dilution | 4 |
| | Saveur à 25 °C | Taux dilution | 4 |
| Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux | Alcalinité | mg/l CaCO ₃ | 65 pour les eaux déssalées ou déminéralisées (valeur minimale) |
| | Calcium | mg/l | 200 |
| | Chlorure | mg/l | 500 |
| | Concentration en ions hydrogène | Unité pH | ≥ 6,5 et ≤ 9 |
| | Conductivité à 20 °C | μS/cm | 2800 |
| | Dureté (TH) | mg/l en CaCO ₃ | 500 |
| | Fer total | mg/l | 0,3 |
| | Manganèse | μg/l | 50 |
| | Phosphore | mg/l | 5 |
| | Potassium | mg/l | 12 |
| | Sodium | mg/l | 200 |
| | Sulfates | mg/l | 400 |
| | Température | °C | 25 |

Décret exécutif n° 14-97 du 2 Jomada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 portant dissolution de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun.

Le Premier Ministre,

Sur le rapport du ministre des ressources en eau,

Vu la Constitution, notamment ses articles 85-3° et 125 (alinéa 2),

Vu le décret présidentiel n° 13-312 du 5 Dhou El Kaâda 1434 correspondant au 11 septembre 2013 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 94-294 du 19 Rabie Ethani 1415 correspondant au 25 septembre 1994 relatif aux modalités de dissolution et de liquidation des entreprises publiques non autonomes et des établissements publics à caractère industriel et commercial ;

Vu le décret exécutif n° 07-337 du 19 Chaoual 1428 correspondant au 31 octobre 2007 portant création de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun ;

Après approbation du Président de la République ;

Décète :

Article 1er. — L'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun, créée par les dispositions du décret exécutif n° 07-337 du 19 Chaoual 1428 correspondant au 31 octobre 2007 portant création de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun est dissoute.

Art. 2. — La dissolution de l'agence prévue à l'article 1er ci-dessus, donne lieu à l'établissement d'un inventaire quantitatif, qualitatif et estimatif dressé conformément aux lois et règlements en vigueur par une commission dont les membres sont désignés conjointement par le ministre des finances et le ministre chargé des ressources en eau.

Art. 3. — Le présent décret sera publié au *Journal Officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger le 2 Jomada El Oula 1435 Correspondant au 4 mars 2014.

Abdelmalek SELLAL.

Art. 5. — Le présent arrêté sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 29 Dhou El Hidja 1435 correspondant au 23 octobre 2014.

Le ministre des ressources en eau Le ministre de la santé, de la population et de la réforme hospitalière

Hocine NECIB Abdelmalek BOUDIAF
Le ministre du commerce Le ministre de l'industrie et des mines

Amara BENYOUNES Abdesselem BOUCHOUAREB

ANNEXE 1

CARACTERISTIQUES DE QUALITE DES EAUX MINERALES NATURELLES

I- La concentration des substances énumérées ci-dessous, ne doit pas dépasser les taux ci-après :

- (sans changement)..... ;
- Arsenic 0,01mg/l exprimé en As total ;
- Baryum 0,7mg/l ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- Manganèse 0,4mg/l ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- Nitrites 0,1mg/l en tant que nitrite ;
- Sélénium 0,01mg/l.

II- les contaminants suivants ne doivent pas être présents en concentration supérieure à la limite de détection des quantifications des méthodes d'analyse officielles ou reconnues à l'échelle internationale utilisées pour leur analyse :

- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;

ANNEXE II

CARACTERISTIQUES DE QUALITE DES EAUX DE SOURCE

CARACTERISTIQUES — UNITE — CONCENTRATIONS

I- Caractéristiques organoleptiques :

— (sans changement)..... ;

2- Caractéristiques physico-chimiques liées à la structure naturelle de l'eau :

— (sans changement)..... ;

— (sans changement)..... ;

| | | |
|------------------------------------------|-----------------|-------------|
| Chlorures | mg/l(Cl) | maximum 500 |
| Sulfates | mg/l(SO4) | maximum 400 |
| Calcium | mg/l(Ca) | maximum 200 |
| Magnésium | mg/l(Mg) | maximum 150 |
| Sodium | mg/l(Na) | maximum 200 |
| Potassium | mg/l(K) | maximum 20 |
| Aluminium total | mg/l | maximum 0,2 |
| Oxydabilité au permanganate de potassium | mg/l en oxygène | maximum 3 |

Résidus secs après dessiccation mg/l à 180°C maximum 2,000

3- Caractéristiques concernant les substances indésirables

| | | |
|-----------|-------------|--------------|
| Nitrates | mg/l de N03 | maximum 50 |
| Nitrites | mg/l de N02 | maximum 0,1 |
| Ammonium | mg/l de NH4 | maximum 0,5 |
| Fluor | mg/l de F | maximum 2 |
| Fer | mg/l (Fe) | maximum 0,3 |
| Manganèse | mg/l (Mn) | maximum 0,5 |
| Cuivre | mg/l (Cu) | maximum 1,5 |
| Zinc | mg/l (Zn) | maximum 5 |
| Argent | mg/l (Ag) | maximum 0,05 |

4- Caractéristiques concernant les substances toxiques :

| | | |
|--------------|-----------|------------|
| Arsenic | µg/l (As) | maximum 10 |
| Cadmium | µg/l (Cd) | maximum 5 |
| Cyanure | µg/l (Cn) | maximum 50 |
| Chrome total | µg/l (Cr) | maximum 50 |
| Mercure | µg/l (Hg) | maximum 1 |
| Plomb | µg/l (Pb) | maximum 10 |
| Sélénium | µg/l (Se) | maximum 10 |

Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H.P.A) :

* Pour le total des 6 µg/l 0,1 substances suivantes :

Art. 5. — Le présent arrêté sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 29 Dhou El Hidja 1435 correspondant au 23 octobre 2014.

Le ministre des ressources en eau Le ministre de la santé, de la population et de la réforme hospitalière

Hocine NECIB Abdelmalek BOUDIAF

Le ministre du commerce Le ministre de l'industrie et des mines

Amara BENYOUNES Abdesselem BOUCHOUAREB

ANNEXE 1

CARACTERISTIQUES DE QUALITE DES EAUX MINERALES NATURELLES

I- La concentration des substances énumérées ci-dessous, ne doit pas dépasser les taux ci-après :

- (sans changement)..... ;
- Arsenic 0,01mg/l exprimé en As total ;
- Baryum 0,7mg/l ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- Manganèse 0,4mg/l ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- Nitrites 0,1mg/l en tant que nitrite ;
- Sélénium 0,01mg/l.

II- les contaminants suivants ne doivent pas être présents en concentration supérieure à la limite de détection des quantifications des méthodes d'analyse officielles ou reconnues à l'échelle internationale utilisées pour leur analyse :

- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;
- (sans changement)..... ;

ANNEXE II

CARACTERISTIQUES DE QUALITE DES EAUX DE SOURCE

CARACTERISTIQUES — UNITE — CONCENTRATIONS

1- Caractéristiques organoleptiques :

— (sans changement)..... ;

2- Caractéristiques physico-chimiques liées à la structure naturelle de l'eau :

— (sans changement)..... ;

— (sans changement)..... ;

| | | |
|------------------------------------------|-----------------|-------------|
| Chlorures | mg/l(Cl) | maximum 500 |
| Sulfates | mg/l(SO4) | maximum 400 |
| Calcium | mg/l(Ca) | maximum 200 |
| Magnésium | mg/l(Mg) | maximum 150 |
| Sodium | mg/l(Na) | maximum 200 |
| Potassium | mg/l(K) | maximum 20 |
| Aluminium total | mg/l | maximum 0,2 |
| Oxydabilité au permanganate de potassium | mg/l en oxygène | maximum 3 |

Résidus secs après dessiccation mg/l à 180°C maximum 2,000

3- Caractéristiques concernant les substances indésirables

| | | |
|-----------|-------------|--------------|
| Nitrates | mg/l de NO3 | maximum 50 |
| Nitrites | mg/l de NO2 | maximum 0,1 |
| Ammonium | mg/l de NH4 | maximum 0,5 |
| Fluor | mg/l de F | maximum 2 |
| Fer | mg/l (Fe) | maximum 0,3 |
| Manganèse | mg/l (Mn) | maximum 0,5 |
| Cuivre | mg/l (Cu) | maximum 1,5 |
| Zinc | mg/l (Zn) | maximum 5 |
| Argent | mg/l (Ag) | maximum 0,05 |

4- Caractéristiques concernant les substances toxiques :

| | | |
|--------------|-----------|------------|
| Arsenic | µg/l (As) | maximum 10 |
| Cadmium | µg/l (Cd) | maximum 5 |
| Cyanure | µg/l (Cn) | maximum 50 |
| Chrome total | µg/l (Cr) | maximum 50 |
| Mercuré | µg/l (Hg) | maximum 1 |
| Plomb | µg/l (Pb) | maximum 10 |
| Sélénium | µg/l (Se) | maximum 10 |

Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H.P.A) :

* Pour le total des 6 µg/l 0,1 substances suivantes :

MINISTERE DU COMMERCE

Arrêté interministériel du Aouel Rabie Ethani 1433 correspondant au 23 février 2012 portant adoption du règlement technique algérien fixant les spécifications, les conditions et les modalités de présentation des préparations destinées aux nourrissons.

Le ministre du commerce,
Le ministre de l'agriculture et du développement rural,
Le ministre de la santé, de la population et de la réforme hospitalière,
Le ministre de l'industrie, de la petite et moyenne entreprise et de la promotion de l'investissement,

Vu le décret présidentiel n° 10-149 du 14 Joumada Ethania 1431 correspondant au 28 mai 2010 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 90-12 du 1er janvier 1990, modifié et complété, fixant les attributions du ministre de l'agriculture ;

Vu le décret exécutif n° 90-39 du 30 janvier 1990, modifié et complété, relatif au contrôle de la qualité et à la répression des fraudes ;

Vu le décret exécutif n° 90-367 du 10 novembre 1990, modifié et complété, relatif à l'étiquetage et à la présentation des denrées alimentaires ;

Vu le décret exécutif n° 91-04 du 19 janvier 1991 relatif aux matériaux destinés à être mis en contact avec les denrées alimentaires et les produits de nettoyage de ces matériaux ;

Vu le décret exécutif n° 91-53 du 23 février 1991 relatif aux conditions d'hygiène exigées lors du processus de la mise à la consommation des denrées alimentaires ;

Vu le décret exécutif n° 02-453 du 17 Chaoual 1423 correspondant au 21 décembre 2002 fixant les attributions du ministre du commerce ;

Vu le décret exécutif n° 04-319 du 22 Chaâbane 1425 correspondant au 7 octobre 2004 fixant les principes d'élaboration, d'adoption et de mise en œuvre des mesures sanitaires et phytosanitaires ;

Vu le décret exécutif n° 05-464 du 4 Dhou El Kaada 1426 correspondant au 6 décembre 2005 relatif à l'organisation et au fonctionnement de la normalisation, notamment ses articles 22 et 28 ;

Vu le décret exécutif n° 05-467 du 8 Dhou El Kaada 1426 correspondant au 10 décembre 2005 fixant les conditions et les modalités de contrôle aux frontières de la conformité des produits importés ;

Vu le décret exécutif n° 11-16 du 20 Safar 1432 correspondant au 25 janvier 2011 fixant les attributions du ministre de l'industrie, de la petite et moyenne entreprise et de la promotion de l'investissement ;

Vu le décret exécutif n° 11-379 du 25 Dhou El Hidja 1432 correspondant au 21 novembre 2011 fixant les attributions du ministre de la santé, de la population et de la réforme hospitalière ;

Vu l'arrêté interministériel du 14 Safar 1415 correspondant au 23 juillet 1994, modifié et complété, relatif aux spécifications microbiologiques de certaines denrées alimentaires ;

Arrêtent :

Article 1er. — En application des dispositions de l'article 28 du décret exécutif n° 05-464 du 4 Dhou El Kaada 1426 correspondant au 6 décembre 2005, susvisé, est adopté le règlement technique fixant les spécifications, les conditions et les modalités de présentation des préparations destinées aux nourrissons, annexé au présent arrêté.

Art. 2. — Le règlement technique, visé à l'article 1er ci-dessus, définit les exigences réglementaires auxquelles doivent répondre les préparations destinées aux nourrissons ainsi que les conditions et les modalités de présentation de ces produits.

Art. 3. — L'entrée en vigueur des dispositions du présent arrêté est fixée à six (6) mois, à compter de la date de sa publication au *Journal officiel*.

Art. 4. — Le présent arrêté sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le Aouel Rabie Ethani 1433 correspondant au 23 février 2012.

| | |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Le ministre du commerce | Le ministre de la santé, de la population et de la réforme hospitalière |
| Mustapha BENBADA | Djamel OULD ABBES |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Le ministre de l'industrie, de la petite et moyenne entreprise et de la promotion de l'investissement | Le ministre de l'agriculture et du développement rural |
| Mohamed BENMERADI | Rachid BENAÏSSA |

ANNEXE

Règlement technique algérien fixant les spécifications, les conditions et les modalités de présentation des préparations destinées aux nourrissons.

Département ministériel initiateur : ministère du commerce

Objectifs légitimes à réaliser :

La sécurité des nourrissons, à travers la mise en place d'un dispositif réglementaire fixant les spécifications techniques permettant la mise sur le marché d'un produit sain répondant aux besoins nutritionnels des nourrissons ;

La maîtrise et le renforcement du contrôle des préparations destinées aux nourrissons fabriquées localement ou importées.

Risques encourus en cas de non-réalisation du ou des objectif (s) légitime (s) :

La multitude gamme de produits mis à la consommation des nourrissons (lait infantile, lait de croissance, lait enrichi en fer...) peut prêter à confusion dans l'esprit du consommateur.

Le non-respect des spécifications techniques auxquelles doivent répondre les préparations destinées aux nourrissons peut engendrer des effets néfastes sur le plan nutritionnel des nourrissons (manque de protéines, de vitamines...) et ainsi peut porter atteinte à la santé des nourrissons.

1/ Objet et domaine d'application :

Le présent règlement technique a pour objet de fixer les spécifications, les conditions et les modalités de présentation des préparations destinées aux nourrissons.

2/ Sources documentaires et normatives :

Le présent règlement technique s'appuie sur :

- la norme *codex alimentarius* Stan 72/1981 (révisions 2007 et 2011) ;
- N A 676 laits et produits laitiers – méthode d'échantillonnage ;
- N A 5912 laits et produits laitiers – lignes directrices générales pour la préparation des échantillons pour essai, de la suspension mère et des dilutions décimales en vue de l'examen microbiologique ;
- N A 674 lait – préparation de l'échantillon pour essai en vue de l'analyse physique et chimique ;
- NA 686 matière grasse laitière – détermination de l'indice de peroxyde ;
- NA 673 lait – détermination des cendres ;
- NA 687 lait sec – détermination de l'acidité titrable – méthode de référence ;
- NA 2676 lait, crème et lait concentré non sucré – détermination de la matière sèche – méthode de référence ;
- NA 2695 méthode normalisée pour le dénombrement des germes totaux dans les poudres de lait et de lactosérum – méthode de référence ;
- NA 2697 poudre de lait et de lactosérum – dénombrement des coliformes – méthode de référence ;
- NA 2688 laits et produits laitiers – recherche de Salmonella Spp ;
- NA 2696 recherche des staphylocoques à coagulase positive dans les poudres de lait – méthode de référence ;
- NA 5911 laits et produits laitiers- dénombrement des unités formant les colonies de levures et/ou moisissures et comptage des colonies à 25 °C.

3/- Exigences à satisfaire :

3/-1 Exigences techniques :

3/ 1-1 Définitions :

– On entend par « **préparation destinée aux nourrissons** » un substitut du lait maternel spécialement fabriqué pour satisfaire à lui seul les besoins nutritionnels des nourrissons pendant les premiers mois de leur vie, jusqu'à l'introduction d'une alimentation complémentaire.

Au sens des dispositions du présent règlement technique, on entend par « **nourrissons** » les enfants âgés de moins de douze (12) mois.

3/ 1-2 Composition :

– Les préparations destinées aux nourrissons sont obtenues à partir de laits de vache, d'autres animaux ou d'un mélange de ces laits et/ou d'autres ingrédients dont il a été démontré qu'ils conviennent à l'alimentation des nourrissons.

– Les préparations destinées aux nourrissons peuvent être présentées sous forme liquide ou en poudre et doivent être composées :

- * de protéines ;
- * de glucides ;
- * de lipides ;
- * de vitamines ;
- * de sels minéraux et d'oligo-éléments ;
- * d'additifs alimentaires autorisés par la réglementation en vigueur.

– Les facteurs essentiels de composition et de qualité des préparations destinées aux nourrissons ainsi que leurs limites minimales et maximales et/ou limites indicatives maximales par 100 k cal et 100 kj sont fixés en annexe I du présent règlement technique.

– Outre la composition énumérée à l'annexe I du présent règlement technique, les substances fixées en annexe II peuvent être ajoutées, à titre facultatif, aux préparations destinées aux nourrissons, pour fournir des substances qui se trouvent habituellement dans le lait maternel et pour garantir que la composition du produit puisse constituer la seule source d'éléments nutritifs du nourrisson ou pour apporter d'autres effets bénéfiques qui sont analogues à ceux obtenus dans les populations de bébés nourris au sein.

– La teneur énergétique des préparations destinées aux nourrissons, présentées sous une forme prête à la consommation, ne doit pas être inférieure à 60 k. cal/100 ml, soit 250 kj/100 ml ; ni supérieure à 70 k. cal/100 ml, soit 295 kj/100 ml.

– Des additifs alimentaires peuvent être incorporés aux préparations destinées aux nourrissons, dans les conditions autorisées par la réglementation en vigueur.

– Tous les ingrédients et additifs alimentaires autorisés dans les préparations destinées aux nourrissons doivent être exempts de gluten.

3/ 1-3 : Teneur en protéines pour les préparations à base d'isolat de soja :

— Pour les préparations destinées aux nourrissons à base d'isolat de protéines de soja, la teneur minimale en protéines est de 2,25 g / 100 K cal, soit 0, 5g /100 KJ.

3/ 1-4 : Teneur en acides :

— La teneur en acide érucique ne doit pas excéder 1% des acides gras totaux et la teneur totale en phospholipides ne doit pas excéder 300 mg/100 Kcal, soit 72 mg /100 KJ, dans les préparations destinées aux nourrissons.

— Les acides lauriques et myristiques, ensemble, ne doivent pas excéder 20% des acides gras totaux utilisés dans les préparations destinées aux nourrissons.

— La teneur en acide gras trans ne doit pas excéder 3% des acides gras totaux utilisés dans les préparations destinées aux nourrissons.

3/ 1-5 Teneur en lipides :

— Les huiles et les graisses hydrogénées ne doivent pas être utilisées dans les préparations destinées aux nourrissons.

3/ 1-6 Teneur en glucides :

— Les glucides présents dans les préparations destinées aux nourrissons à base de protéines de lait de vache et de protéines hydrolysées, devraient être de préférence des polymères de lactose et de glucose.

— Seuls les amidons, précuits et/ou gélatinisés naturellement exempts de gluten, peuvent être ajoutés aux préparations destinées aux nourrissons et ne doivent pas excéder 30 % des glucides totaux, soit 2g /100 ml de produit.

— L'ajout du saccharose, à moins qu'il ne soit nécessaire et l'ajout de fructose en tant qu'ingrédient, doivent être évités dans les préparations destinées aux nourrissons.

3/ 1-7 Teneur en fluorure :

— La teneur du fluorure ajoutée aux préparations destinées aux nourrissons ne doit pas excéder 100ug /100 k. cal, soit 24ug /100 KJ.

3/ 2 Exigences sanitaires :**3/ 2-1 Contaminants :**

— La quantité limite de plomb contenue dans les préparations destinées aux nourrissons ne doit pas excéder 0,02 mg /kg dans le produit prêt à l'emploi.

— Les préparations destinées aux nourrissons ne doivent pas contenir de contaminants et de substances indésirables en quantités susceptibles de présenter un danger pour la santé du nourrisson.

3/ 2-2 Pesticides :

— Les préparations destinées aux nourrissons doivent être préparées avec un soin particulier, selon les bonnes pratiques de fabrication, de manière que les résidus de pesticides, qui peuvent être nécessaires pendant la production, l'emmagasiner ou la transformation des matières premières ou des ingrédients du produit fini, disparaissent.

3/ 2-3 Hygiène :

— Tous les ingrédients doivent être propres, de qualité et sans danger pour le nourrisson. Chaque ingrédient doit être conforme aux normes de qualité, notamment en ce qui concerne la couleur, la saveur et l'odeur.

— Les préparations destinées aux nourrissons doivent satisfaire aux spécifications microbiologiques fixées par la réglementation en vigueur.

3/ 2-4 Traitement :

— Les préparations destinées aux nourrissons doivent être traitées uniquement par des procédés physiques et doivent être conditionnées de manière à prévenir toute dégradation ou contamination dans les conditions normales de manipulation, d'entreposage et de distribution.

— Les préparations destinées aux nourrissons et leurs constituants ne doivent pas subir de traitements par des rayonnements ionisants.

3/ 3 Exigences commerciales :**3/ 3-1 Pureté de la poudre :**

— Les préparations destinées aux nourrissons ne doivent pas contenir de grumeaux, ni de particules de grandes dimensions et doivent être adaptées à l'alimentation des nourrissons.

3/ 3-2 Conditionnement :

— Les préparations destinées aux nourrissons doivent être conditionnées dans des récipients qui préservent l'hygiène et la qualité de l'aliment. Elles doivent être conditionnées dans des récipients hermétiquement fermés.

— De l'azote et du gaz carbonique peuvent être utilisés comme milieux de couverture dans les préparations destinées aux nourrissons.

3/ 3-3 Etiquetage :

— Outre les prescriptions prévues par la réglementation en vigueur, les mentions suivantes doivent apparaître sur l'étiquetage :

* les sources des protéines ;

* « préparation lactée pour nourrissons », si le lait de vache est l'unique source de protéines ;

* la liste complète des ingrédients énumérés par ordre décroissant selon leurs proportions. Toutefois, lorsque des vitamines et des sels minéraux sont ajoutés, ces substances peuvent être énumérées dans des groupes distincts, à savoir vitamines et sels minéraux ;

* la valeur énergétique, exprimée en kilocalories (K. cal) et/ou en kilojoules (K j) et le nombre de grammes de protéines, de glucides et de lipides fournis par 100 grammes ou par 100 millilitres de l'aliment tel qu'il est vendu ainsi que par 100 millilitres de l'aliment prêt à l'emploi, lorsqu'il est préparé conformément aux instructions figurant sur l'étiquette ;

* « sans lait, ni produit laitier » ou mention équivalente, si le produit ne contient ni lait, ni dérivé du lait ;

* un dessin clair pour illustrer le mode d'emploi du produit ;

* les conditions particulières pour l'entreposage ;

* les instructions relatives à l'entreposage, après ouverture du récipient ;

* « le lait maternel est le meilleur aliment pour votre bébé » ou une mention similaire indiquant la supériorité de l'allaitement au sein ou du lait maternel.

Afin de ne pas décourager l'allaitement au sein, les mentions suivantes ne doivent pas apparaître sur l'étiquetage :

— les images de nourrissons ou de femmes, ni aucune autre représentation ou texte idéalisant l'emploi des préparations destinées aux nourrissons ;

— le terme « humanisé » ou « maternisé » ou d'autres termes analogues.

4/- Procédures d'évaluation de la conformité :

Pour évaluer la conformité des préparations destinées aux nourrissons, objet du présent règlement technique, il y a lieu de se référer aux procédures d'évaluation de la conformité décrites dans les normes algériennes en vigueur ci-après :

NA 676, NA 5912, NA 674, NA 686, NA 673, NA 687, NA 2676 , NA 2695, NA 2697, NA 2688, NA 2696, NA 5911.

5 Annexes :

5- 1 Facteurs essentiels de composition et de qualité des préparations destinées aux nourrissons :

Les facteurs essentiels de composition et de qualité des préparations destinées aux nourrissons sont fixés à l'annexe I du présent règlement technique.

5- 2 Ingrédients facultatifs pouvant être utilisés dans les préparations destinées aux nourrissons :

Les ingrédients facultatifs pouvant être utilisés dans les préparations destinées aux nourrissons sont fixés à l'annexe II du présent règlement technique.

ANNEXE I

Facteurs essentiels de composition et de qualité des préparations destinées aux nourrissons

| Unité | Minimum | Maximum | Limite indicative maximale (LIM) |
|---------------------------------------------------|---------|---------------|----------------------------------|
| Protéines | | | |
| g/100 k cal | 1,8(1) | 3,0 | - |
| g/100 kj | 0,45(1) | 0,7 | - |
| Lipides | | | |
| • lipides totaux | | | |
| g/100 k cal | 4,4 | 6,0 | - |
| g/100 kj | 1,05 | 1,4 | - |
| • acide linoléique | | | |
| mg/100 k cal | 300 | - | 1400 |
| mg/100 kj | 70 | - | 330 |
| • -acide linoléique | | | |
| mg/100 k cal | 50 | non spécifiée | - |
| mg/100 kj | 12 | non spécifiée | - |
| • rapport acide linoléique / -acide linoléique | 5 : 1 | 15 : 1 | |
| Glucides | | | |
| • Glucides totaux | | | |
| g/100 k cal | 9,0 | 14,0 | - |
| g/100 kj | 2,2 | 3,3 | - |

LIM : ces limites sont calculées en fonction des besoins nutritionnels des nourrissons et d'une utilisation sans danger.

L'objectif de ces limites est de fournir des orientations aux fabricants et elles ne doivent pas être interprétées comme des valeurs cibles.

(1) Les valeurs minimales s'appliquent aux protéines de vache. D'autres valeurs minimales devront éventuellement être appliquées pour les préparations pour nourrissons à base de protéines de laits autres que celui de vache.

Pour les préparations à base d'isolat de protéines de soja, il faut appliquer une valeur minimale de 2,25 g/100 k cal (0,5 g/100 KJ).

| Vitamines | | | |
|-----------------------|------|-----|-----|
| . Vitamine A | | | |
| µg ER (2) /100 k cal | 60 | 180 | - |
| µg ER (2) /100 kj | 14 | 43 | - |
| . Vitamine D3 | | | |
| µg (3) /100 k cal | 1 | 2,5 | - |
| µg (3) /100 kj | 0,25 | 0,6 | - |
| . Vitamine E | | | |
| mg aTE (4) /100 k cal | 0,5 | - | 5 |
| mg a TE (4) /100 kj | 0,12 | - | 1,2 |
| . Vitamine K | | | |
| µg/100 k cal | 4 | - | 27 |
| µg/100 kj | 1 | - | 6,5 |
| . Thiamine | | | |
| µg/100 k cal | 60 | - | 300 |
| g/100 kj | 14 | - | 72 |
| . Riboflavine | | | |
| µg/100 k cal | 80 | - | 500 |
| g/100 kj | 19 | - | 119 |

2) Exprimé en équivalent rétinol (ER).

1 µg ER = 3,33 UI vitamine A = 1 µg tous rétinol trans.

Les teneurs en rétinol seront fournies par du rétinol préformé, tandis que les teneurs en caroténoïdes ne doivent pas être incluses dans le calcul de la teneur en vitamine A.

(3) Calciférol. 1 µg calciférol = 40 UI vitamine D.

(4) 1 mg a - TE (alpha - tocophérole équivalent) = 1 mg d - a tocophérole.

| | | | |
|------------------------------|-------|---|------|
| . Niacine (5) | | | |
| µg /100 k cal | 300 | - | 1500 |
| µg /100 kj | 70 | - | 360 |
| . Vitamine B6 | | | |
| µg /100 k cal | 35 | - | 175 |
| µg (3) /100 kj | 8,5 | - | 45 |
| . Vitamine B12 | | | |
| µg /100 k cal | 0,1 | - | 1,5 |
| µg /100 kj | 0,025 | - | 0,36 |
| . Acide pantothénique | | | |
| µg/100 k cal | 400 | - | 2000 |
| µg/100 kj | 96 | - | 478 |
| . Acide folique | | | |
| µg /100 k cal | 10 | - | 50 |
| µg /100 kj | 2,5 | - | 12 |
| . Vitamine C (6) | | | |
| mg/100 k cal | 10 | - | 70 |
| mg/100 kj | 2,5 | - | 17 |
| . Biotine | | | |
| µg/100 k cal | 1,5 | - | 10 |
| µg/100 kj | 0,4 | - | 2,4 |

(5) Correspond à la niacine préformée.

(6) Exprimé en acide ascorbique.

| | | | |
|----------------------------------------|-------|---------------|------|
| Sels minéraux et oligo-éléments | | | |
| . Fer | | | |
| mg /100 k cal | 0,45 | - | - |
| mg /100 kj | 0,1 | - | - |
| . Calcium | | | |
| mg /100 k cal | 50 | - | 140 |
| mg /100 kj | 12 | - | 35 |
| . Phosphore | | | |
| mg /100 k cal | 25 | - | 100 |
| mg /100 kj | 6 | - | 24 |
| . Rapport calcium / phosphore | | | |
| | 1 : 1 | 2 : 1 | |
| . Magnésium | | | |
| mg/100 k cal | 5 | - | 15 |
| mg/100 kj | 1,2 | - | 3,6 |
| . Sodium | | | |
| mg /100 k cal | 20 | 60 | - |
| mg /100 kj | 5 | 14 | - |
| . Chlorure | | | |
| mg/100 k cal | 50 | 160 | - |
| mg/100 kj | 12 | 38 | - |
| . Potassium | | | |
| mg/100 k cal | 60 | 180 | - |
| mg/100 kj | 14 | 43 | - |
| . Manganèse | | | |
| µg/100 k cal | 1 | - | 100 |
| µg/100 kj | 0,25 | - | 24 |
| . Iode | | | |
| µg/100 k cal | 10 | - | 60 |
| µg/100 kj | 2,5 | - | 14 |
| . Sélénium | | | |
| µg/100 k cal | 1 | - | 9 |
| µg/100 kj | 0,24 | - | 2,2 |
| . Cuivre | | | |
| µg/100 k cal | 35 | - | 120 |
| µg/100 kj | 8,5 | - | 29 |
| . Zine | | | |
| mg/100 k cal | 0,5 | - | 1,5 |
| mg/100 kj | 0,12 | - | 0,36 |
| Autres substances | | | |
| . Choline | | | |
| mg/100 k cal | 7 | - | 50 |
| mg/100 kj | 1,7 | - | 12 |
| . Myo-inositol | | | |
| mg/100 k cal | 4 | - | 40 |
| mg/100 kj | 1 | - | 9,5 |
| . L-Carnitine | | | |
| mg/100 k cal | 1,2 | non spécifiée | |
| mg/100 kj | 0,3 | non spécifiée | |

ANNEXE II

Ingrédients facultatifs pouvant être utilisés dans les préparations destinées aux nourrissons

| Unité | Minimum | Maximum | Limite indicative maximale |
|----------------------------------|---------|---------|----------------------------|
| . Taurine | | | |
| mg/100 k cal | - | 12 | - |
| mg/100 kj | - | 3 | - |
| . Acide docosahéx énoïque | | | |
| % d'acides gras | - | - | 0,5 |



Arrêté du 5 Moharram 1433 correspondant au 30 novembre 2011 portant désignation des membres du comité d'évaluation et d'unification des méthodes d'analyses et d'essais.

Par arrêté du 5 Moharram 1433 correspondant au 30 novembre 2011, en application des dispositions de l'article 19 bis 1 du décret exécutif n° 90-39 du 30 janvier 1990, modifié et complété, relatif au contrôle de la qualité et à la répression des fraudes, sont désignés membres du comité d'évaluation et d'unification des méthodes d'analyses et d'essais, Mmes et MM. :

- Ramdane Bousseadjji, représentant du ministre du commerce, président ;
- Lemnour Djebairia, représentant du ministre de la défense nationale, membre ;
- Abderrahmane Mouffok, représentant du ministre de l'intérieur et des collectivités locales, membre ;
- Boubakeur Dahlal, représentant du ministre des finances, membre ;
- Mohamed Salah, représentant du ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, membre ;
- Naâmane Baouta, représentant du ministre de l'industrie, de la petite et moyenne entreprise et de la promotion de l'investissement, membre ;
- Dalila Hemmam, représentante du ministre de l'agriculture et du développement rural, membre ;
- Mohamed Ben Slimane Mansouri, représentant du ministre de la santé, de la population et de la réforme hospitalière, membre ;
- Abdelatif Mestiri, représentant du ministre des ressources en eau, membre ;
- Yasmina Boutaba, représentante du ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement, membre ;
- Nawal Angag, représentante du ministre de la pêche et des ressources halieutiques, membre ;
- Mohamed Belamri, représentant du commissariat à l'énergie atomique, membre ;
- Ghania Sanhadji, représentante du centre algérien du contrôle de la qualité et de l'emballage, membre ;
- Boualem Attou, représentant de l'institut algérien de la normalisation, membre ;
- Rabah Msili, représentant de l'office national de la métrologie légale, membre.

Arrêté du 7 Rajab 1433 correspondant au 28 mai 2012 portant modification et mise à jour de la nomenclature des activités économiques soumises à inscription au registre du commerce.

Le ministre du commerce,

Vu le décret présidentiel n° 10-149 du 14 Joumada Ethania 1431 correspondant au 28 mai 2010 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 97-39 du 9 Ramadhan 1417 correspondant au 18 janvier 1997, modifié et complété, relatif à la nomenclature des activités économiques soumises à inscription au registre du commerce, notamment son article 6 ;

Vu le décret exécutif n° 97-41 du 9 Ramadhan 1417 correspondant au 18 janvier 1997, modifié et complété, relatif aux conditions d'inscription au registre du commerce ;

Vu le décret exécutif n° 02-453 du 7 Chaoual 1423 correspondant au 21 décembre 2002 fixant les attributions du ministre du commerce ;

Arrête :

Article 1er. — En application des dispositions de l'article 6 du décret exécutif n° 97-39 du 9 Ramadhan 1417 correspondant au 18 janvier 1997, modifié et complété, susvisé, le présent arrêté a pour objet de modifier et de mettre à jour la nomenclature des activités économiques soumises à inscription au registre du commerce.

Art. 2. — La nomenclature des activités économiques soumises à inscription au registre du commerce, modifiée et mise à jour, est annexée à l'original du présent arrêté.

Art. 3. — Le présent arrêté sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 7 Rajab 1433 correspondant au 28 mai 2012.

Mustapha BENBADA.

RÉSUMÉ

Résumé

L'aluminium est un métal exogène dépourvu de fonction biologique connue, dont la toxicité suscite des inquiétudes particulières chez les nourrissons. La présente étude, menée dans la wilaya d'Annaba, vise à évaluer les taux d'aluminium dans les préparations pour nourrissons (PPN), dans les eaux utilisées pour leur reconstitution, ainsi que les quantités relarguées par les ustensiles en aluminium lors du chauffage.

L'enquête, réalisée auprès de 874 mères, met en évidence une prédominance de l'allaitement artificiel exclusif (48,3 %) et une fréquence élevée de l'utilisation de casseroles en aluminium pour l'ébullition de l'eau (57,66 %). L'analyse de 61 échantillons de laits infantiles a révélé une présence systématique d'aluminium, avec une teneur moyenne de 2,645 µg/g, largement supérieure à celle du lait maternel (0,079 µg/g). Les formules à base de soja présentent les niveaux les plus élevés particulièrement élevés (jusqu'à 7 µg/g). Parallèlement, l'analyse de 66 échantillons d'eaux a montré que 25 % des eaux minérales et 16,7 % des eaux de source dépassaient la limite réglementaire de 200 µg/L. Le chauffage dans des ustensiles en aluminium accentue fortement cette contamination, avec des concentrations atteignant jusqu'à 2867 µg/L dans certains cas. L'évaluation des doses hebdomadaires ingérées montre que si la plupart des nourrissons restent en dessous de la dose tolérable, certaines situations d'exposition cumulative dépassent ce seuil, ce qui pose un réel risque sanitaire. Les analyses chimométriques ont confirmé l'influence de certains ions (bicarbonates, fluorures) sur le relargage de l'aluminium.

Ces résultats fournissent des données essentielles pour guider les politiques de santé publique et ouvrent des perspectives de recherche sur les effets à long terme d'une exposition précoce à l'aluminium.

Mots clés : aluminium, préparations pour nourrissons, eau, relargage, allaitement artificiel, chimométrie.

ABSTRACT

Aluminum is an exogenous metal with no known biological function, whose toxicity raises particular concern in infants due to their physiological vulnerability. This study, conducted in the Wilaya of Annaba, aimed to assess aluminum levels in infant formula (PPN), in the water used for its reconstitution, as well as the amounts released from aluminum cookware during heating.

A survey conducted among 874 mothers revealed a predominance of exclusive formula feeding (48,3%) and a high frequency of using aluminum pots to boil water (57,66%). Analysis of 61 samples of infant formula showed a systematic presence of aluminum, with a mean concentration of 2,645 $\mu\text{g/g}$ —substantially higher than that found in breast milk (0,079 $\mu\text{g/g}$). Soy-based formulas exhibited the highest levels, reaching up to 7 $\mu\text{g/g}$. In parallel, 66 water samples were analyzed: 25% of mineral waters and 16,7% of spring waters exceeded the regulatory limit of 200 $\mu\text{g/L}$. Boiling water in aluminum utensils further intensified contamination, with concentrations reaching up to 2867 $\mu\text{g/L}$ in some cases.

The evaluation of weekly ingested doses showed that while most infants remained below the tolerable weekly intake (TWI), certain scenarios of cumulative exposure exceeded this threshold, posing a real health risk. Chemometric analyses confirmed the moderating effect of certain ions, such as bicarbonates and fluorides, on aluminum release.

These findings provide essential data to support public health policymaking and open avenues for further research on the long-term effects of early-life aluminum exposure.

Keywords: aluminum, infant formula, water, leaching, formula feeding, chemometrics.

ملخص

الألومنيوم، معدن خارجي لا دور بيولوجي معروف له، يُثير القلق بسبب سُميته لدى الرُضّع نتيجة عدم اكتمال نضج أعضائهم يُعدّ الألومنيوم معدنًا خارجيًا لا يؤدي أي وظيفة بيولوجية معروفة، وتثير سُميته مخاوف خاصة لدى الرُضّع نظرًا لهشاشتهم الفسيولوجية. تهدف هذه الدراسة، التي أُجريت في ولاية عنابة، إلى تقييم مستويات الألومنيوم في مستحضرات تغذية الرُضّع، وفي المياه المستخدمة لتحضيرها، بالإضافة إلى الكميات المُحررة من أواني الطهي المصنوعة من الألومنيوم أثناء الغليان.

كُشفت الاستبيانات، التي شملت 874 أمًا، عن هيمنة الرضاعة الصناعية الحصرية (48.3٪)، إلى جانب الاستخدام المتكرر لأواني الألومنيوم في غلي المياه (57.66٪). أظهرت تحاليل 61 عينة من حليب الرُضّع الصناعي وجودًا منتظمًا للألومنيوم، بمتوسط تركيز بلغ 2.645 ميكروغرام/غرام، وهو أعلى بكثير مقارنةً بتركيزه في حليب الأم (0.079 ميكروغرام/غرام). وسجّلت تركيبات الحليب المعتمدة على الصويا أعلى التراكم، بحد أقصى بلغ 7 ميكروغرام/غرام.

بالموازاة، أُجريت تحاليل على 66 عينة مياه، حيث تجاوزت 25٪ من المياه المعدنية و16.7٪ من مياه الينابيع الحد التنظيمي البالغ 200 ميكروغرام/لتر. كما أدى غلي المياه في أواني الألومنيوم إلى تفاقم التلوث، إذ وصلت التراكمات إلى 2867 ميكروغرام/لتر في بعض الحالات.

أظهرت نتائج تقييم الجرعات الأسبوعية المُتناولة أن معظم الرُضّع يبقون دون الحد الأسبوعي المقبول (1 ملغ/كغ/أسبوع حسب هيئة EFSA)، غير أن بعض سيناريوهات التعرض التراكمي تتجاوز هذا الحد، مما يشكل خطرًا صحيًا فعليًا. وقد أكّدت التحاليل الكيميوومترية دور بعض الأيونات (كالبيكربونات والفلوريد) في الحد من تحرر الألومنيوم.

تُوفر هذه النتائج معطيات أساسية من شأنها توجيه السياسات الصحية العامة، كما تفتح آفاقًا بحثية حول الآثار بعيدة المدى للتعرض المبكر للألومنيوم..

الكلمات المفتاحية: الألومنيوم، مستحضرات تغذية الرُضّع، المياه، التحرر، الرضاعة الصناعية، الكيمياء الإحصائية

RÉSUMÉ

L'aluminium est un métal exogène dépourvu de fonction biologique connue, dont la toxicité suscite des inquiétudes particulières chez les nourrissons. La présente étude, menée dans la wilaya d'Annaba, vise à évaluer les taux d'aluminium dans les préparations pour nourrissons (PPN), dans les eaux utilisées pour leur reconstitution, ainsi que les quantités relarguées par les ustensiles en aluminium lors du chauffage.

L'enquête, réalisée auprès de 874 mères, met en évidence une prédominance de l'allaitement artificiel exclusif (48,3 %) et une fréquence élevée de l'utilisation de casseroles en aluminium pour l'ébullition de l'eau (57,66 %). L'analyse de 61 échantillons de laits infantiles a révélé une présence systématique d'aluminium, avec une teneur moyenne de 2,645 µg/g, largement supérieure à celle du lait maternel (0,079 µg/g). Les formules à base de soja présentent les niveaux les plus élevés particulièrement élevés (jusqu'à 7 µg/g). Parallèlement, l'analyse de 66 échantillons d'eaux a montré que 25 % des eaux minérales et 16,7 % des eaux de source dépassaient la limite réglementaire de 200 µg/L. Le chauffage dans des ustensiles en aluminium accentue fortement cette contamination, avec des concentrations atteignant jusqu'à 2867 µg/L dans certains cas. L'évaluation des doses hebdomadaires ingérées montre que si la plupart des nourrissons restent en dessous de la dose tolérable, certaines situations d'exposition cumulative dépassent ce seuil, ce qui pose un réel risque sanitaire. Les analyses chimométriques ont confirmé l'influence de certains ions (bicarbonates, fluorures) sur le relargage de l'aluminium.

Ces résultats fournissent des données essentielles pour guider les politiques de santé publique et ouvrent des perspectives de recherche sur les effets à long terme d'une exposition précoce à l'aluminium.

Mots clés : aluminium, préparations pour nourrissons, eau, relargage, allaitement artificiel, chimométrie.