



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université MOULOUD MAMMARI de TIZI-OUZOU  
Faculté des sciences biologiques et des sciences Agronomiques  
Département des sciences agronomiques

# Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master En sciences agronomiques  
Spécialité : Eau et Environnement

## Thème

Synthèse bibliographique sur l'utilisation de  
l'Aluminium : cas des sels d'Aluminium  
dans le traitement de l'eau

Présenté par :

M<sup>elle</sup> BOUCEFAR Lylia et M<sup>elle</sup> DJETTOU Rosa

Devant le jury:

M <sup>r</sup> BERRADJ O.	Maître de conférences B	UMMTO	Président
M <sup>r</sup> METAHRI M.S.	Maître de conférences A	UMMTO	Promoteur
M <sup>me</sup> BERROUANE N.	Enseignante	UMMTO	Co-promotrice
M <sup>r</sup> SMAIL A.	Maître conférences B	UMMTO	Examineur

Promotion : 2019/2020

## *Remerciements*

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à la contribution de plusieurs personnes à qui on voudrait rendre hommage et témoigner toute notre reconnaissance.*

*On tient d'abord à remercier Mr. Metahri, M. S d'avoir accepté de nous encadrer, pour son aide précieuse ainsi pour ses conseils avisés et encouragements.*

*On tient aussi à exprimer nos infimes remerciements à M<sup>me</sup> Berrouane. N pour avoir accepté de co-encadrer ce travail, pour tous ses efforts, son savoir, ses idées, ses judicieux conseils et sa confiance en nous. Cela était un privilège pour nous de travailler sous sa direction.*

*Nous remercions Mr. Berradj, O maître de conférence à l'université de mouloud Mammeri pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de le juger et de présider le jury.*

*Nous tenons également à remercier Mr. Smail, A maître de conférence à l'université de mouloud Mammeri, pour l'intérêt qu'il accorder à ce travail et sa présence en tant qu'examineur, mais aussi pour ses remarquables conseils et de nous avoir guidé.*

*En fin, on voudrait témoigner notre gratitude envers toute personne qui a apporté son support moral et intellectuel tout au long de la réalisation de notre travail*

## *Dédicaces*

### *A mes parents,*

*Grace à votre soutien sans faille et inconditionnel durant toutes ces années que j'ai pu devenir la personne que je suis.*

*Je vous dédie ce travail, aboutissement d'années d'études qui n'auraient pas été possibles sans vous.*

*Je vous aime fort !*

### *A ma grand-mère,*

*J'aurai tant aimé que tu sois là en ce jour, repose en paix.*

### *A mes frères et leurs familles,*

*On ne choisit pas sa famille. Mais si j'avais eu le choix, c'est vous que j'aurais voulu.*

*Merci d'être là.*

### *A Yacine,*

*Merci pour ton aide, ton affection, ta patience et ton soutien. Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans toi. Tu as su supporter et résister à mes doutes. Ta présence dans ma vie est une richesse.*

### *A ma binôme et sa famille,*

*Il est difficile de remercier tout le monde, car de nombreuses personnes m'ont accompagné tout au long de ma vie pour me mener là où j'en suis aujourd'hui. Que les personnes que j'aurais oublié de citer veuillent bien m'excuser.*

*Lylia*

## *Dédicaces*

### *À MES CHERS PARENTS*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.*

### *A Redha*

*Mon conseiller, qui m'a assisté dans les moments difficiles et m'a pris doucement par la main pour traverser ensemble des épreuves pénibles...Je te suis très reconnaissante, et je ne te remercierai jamais assez pour ton amabilité, ta générosité, ton aide précieuse.*

### *À MES CHERS ET ADORABLE FRÈRES*

*Merci d'être là.*

### *A ma chère binôme*

*C'est Grâce à ta compréhension et ton encouragement ainsi que tes énormes efforts que ce travail a pu voir le jour, un simple merci ne suffira pas pour exprimer ma reconnaissance envers toi.*

*À TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPÉ À L'ÉLABORATION DE CE TRAVAIL. À TOUS CEUX QUE J'AI OUS DE CITER.*

*Rosa*

# Tables des matières

<b>Introduction .....</b>	<b>02</b>
<b>Chapitre I : Aluminium .....</b>	<b>03</b>
<b>Partie I : Généralités sur l'Aluminium .....</b>	<b>04</b>
<b>1. Aluminium .....</b>	<b>04</b>
<b>2. Origine de l'Aluminium.....</b>	<b>04</b>
<b>3. Propriétés physico-chimiques.....</b>	<b>05</b>
<b>4. Domaines d'utilisation .....</b>	<b>05</b>
<b>Partie II : Sources d'exposition à l'Aluminium.....</b>	<b>07</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>07</b>
<b>2. Aluminium dans l'environnement.....</b>	<b>07</b>
<b>3. Aluminium dans l'eau .....</b>	<b>07</b>
<b>3.1. Eau de robinet.....</b>	<b>07</b>
<b>3.2. Eaux embouteillées .....</b>	<b>10</b>
<b>4. Aluminium dans les aliments .....</b>	<b>11</b>
<b>5. Aluminium dans les produits de santé .....</b>	<b>12</b>
<b>5.1 Médicaments .....</b>	<b>12</b>
<b>5.2 Vaccins.....</b>	<b>13</b>
<b>5.3 Eau de dialyse .....</b>	<b>13</b>
<b>5.4 Produits cosmétiques .....</b>	<b>14</b>
<b>6. Bilan de l'exposition à l'Aluminium chez la population générale.....</b>	<b>14</b>
<b>Chapitre II : Bioaccumulation et Toxicité de l'Aluminium .....</b>	<b>16</b>

<b>1. Cinétique de l'Aluminium dans l'organisme.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Absorption de l'Aluminium dans l'organisme .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Distribution de l'Aluminium dans l'organisme .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 Elimination de l'Aluminium .....</b>	<b>19</b>
<b>2. Toxicité de l'Aluminium .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Toxicité aiguë .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Toxicité chronique .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.1 Effets neurologiques.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.2 Effets Immunitaires.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.3 Effets cancérigènes .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.4 Autres Effets .....</b>	<b>23</b>
<b>Discussion et Perspectives.....</b>	<b>27</b>
<b>1. Discussion .....</b>	<b>27</b>
<b>2. Alternatives envisageables à l'utilisation de l'Aluminium .....</b>	<b>30</b>
<b>2.1 Cas des sels d'Aluminium dans le traitement de l'eau .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.1 Coagulants Végétaux .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.2 Autres coagulants .....</b>	<b>34</b>
<b>2.2 Autres alternatives à l'Aluminium .....</b>	<b>35</b>
<b>3. Elimination de l'Aluminium du corps humain.....</b>	<b>36</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>37</b>

## Liste des tableaux

Tableau N°	Titre	Page
01	Normes appliqué pour les paramètres chimiques de l'eau potable	10
02	Médicaments contenant de l'Aluminium	12
03	Sels d'Aluminium utilisés dans les vaccins	13
04	Bilan de l'exposition systémique à l'Aluminium chez la population générale	15

## Liste des figures

<b>Figure N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>01</b>	Abondance de l'Aluminium dans l'écorce terrestre	<b>02</b>
<b>02</b>	Différentes formes d'Aluminium dans l'eau	<b>06</b>
<b>03</b>	Principe de la coagulation-floculation	<b>08</b>
<b>04</b>	Distribution de l'Aluminium dans l'organisme	<b>19</b>
<b>05</b>	Plante d'acacia noir dont le Tanfloc est extrait	<b>32</b>
<b>06</b>	Plante de Moringa Oleifera	<b>32</b>
<b>07</b>	Figuier de Barbarie	<b>33</b>
<b>08</b>	feuilles de chêne	<b>33</b>
<b>09</b>	Algue marine brune dont l'alginate est	<b>34</b>

## Liste des abréviations

ABD : Aluminium bone disease

AFSSA : Agence française de sécurité alimentaire

AFSSAPS : Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé

AIBD : Aluminium Induced Bone Disease

Al : Aluminium

AMESSI : Alternatives médecines évolutives santé et sciences innovantes

AMM : Autorisation de mise sur le marché

ATSDR : Agency for toxic substances and disease registry

BDCM : Bromodichlorométhane

CIRC : Centre international de recherche contre le cancer

CSSC : Comité scientifique européen pour la sécurité des consommateurs

DBCM : Dibromochlorométhane

DBO : demande biologique en oxygène

DCO : Demande chimique en Oxygène

E.A.A : European Aluminium association

EFSA : European food safety agency

FAO : Food and agriculture organization

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

IM : Intra musculaire

INRS : Institut national de la recherche scientifique

INSPQ : Institut national de santé publique du Québec

INVS : Institut de veille sanitaire

MES : Matière En Suspension

MFM : Myofasciite à macrophages

MO : Moringa Oleifera

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

OMS : Organisation mondiale de la santé

SEP : Sclérose en plaque

TBM : Bromoforme

TCM : Chloroforme

THM :Trihalométhanes

Vaccin DT : Vaccin combiné contre la diphtérie et le tétanos

# **Introduction**

La qualité des eaux est souvent souillée par les différentes activités anthropiques, pour cela des traitements de plus en plus robustes doivent être mis en place. A ce titre des sels d'Aluminium sont couramment utilisés lors de la phase de coagulation et floculation pour l'abattement de la turbidité à des niveaux recommandés par les normes en vigueur. La présence de l'Aluminium dans les eaux de consommation est due principalement à son utilisation comme agents coagulant mais aussi il peut s'infiltrer dans l'eau potable à partir de tuyaux ou de revêtements en mortier de ciment (Metahri *et al.*, 2017).

L'omniprésence de l'Aluminium dans les produits alimentaires et sanitaires est due à son rôle de catalyseur car, l'Aluminium occupe une position importante que, ni l'industrie, ni ses utilisateurs sous ses nombreuses formes n'ont exigée de certitudes par rapport à son innocuité pour l'Homme (Exley, 2017 ; Medjdoul *et al.*, 2018).

L'Aluminium n'est pas présent de manière naturelle chez l'Homme, il ne participe à aucune fonction essentielle connue. Il est donc susceptible de conduire à une intoxication en cas d'exposition. Depuis plusieurs années, les effets de l'Aluminium sur la santé ont été au centre des préoccupations de la population, des professionnels de santé, des scientifiques et des autorités. Les effets indésirables de l'Aluminium ont alors fait l'objet de nombreuses études scientifiques. Et les autorités ont été amenées à réévaluer le rapport bénéfices-risques de l'utilisation de ce métal et de ses dérivés (Batisse, 2014 ; Exley, 2017).

Dans cette étude, nous nous intéresserons dans un premier temps aux liens qui existent entre l'utilisation de l'Aluminium et la santé, afin de mieux le comprendre, tout en faisant au préalable un état des lieux des connaissances actuelles.

En second lieu, nous présenterons de manière plus approfondie les différentes voies d'expositions à l'Aluminium tout en se focalisant sur sa présence dans l'eau (étant l'élément de loin le plus consommé), sa cinétique dans l'organisme, les effets indésirables ainsi que sa toxicité.

Enfin, nous exposerons les alternatives envisageables qu'il est possible de mettre en place pour limiter et/ou optimiser l'utilisation de l'Aluminium dans les différents secteurs et spécialement la substitution des sels d'Aluminium dans le traitement de potabilisation par des coagulants à base végétal.

# **Chapitre I : Aluminium**

## Partie I : Généralité sur l'Aluminium

## 1. Aluminium

L'Aluminium vient du latin *alumen*, qui signifie léger. C'est un Élément chimique métallique appartenant à la catégorie des métaux du bloc p du tableau périodique, comme le plomb ou l'étain. Son symbole est Al dans la classification périodique des Eléments, son numéro atomique est le 13. C'est le troisième Élément le plus abondant de l'écorce terrestre derrière l'oxygène et le silicium (figure 01). C'est un métal particulièrement réactif qui n'existe que très peu à l'Etat natif dans le milieu naturel (Klein, 2015).

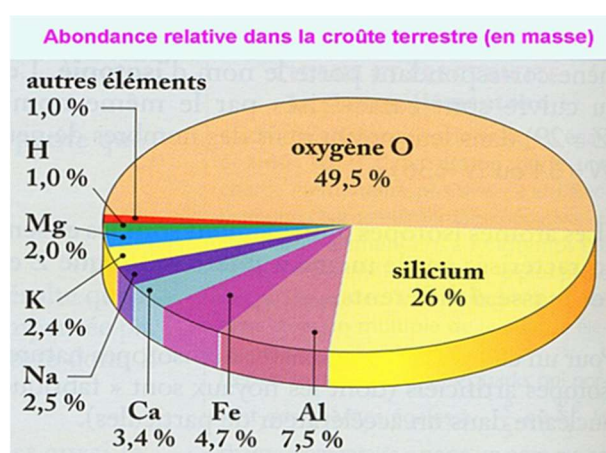


Figure 01 : Abondance de l'Aluminium dans l'écorce terrestre (Medjdoul *et al.*, 2018).

## 2. Origine de l'Aluminium

L'Aluminium se trouve dans certains minéraux des roches magmatiques acides (feldspaths et micas) ou basiques (plagioclases calciques et certains pyroxènes et amphiboles) ; ou dans certaines roches sédimentaires comme l'argile, la bauxite ou le schiste. Du fait de sa grande réactivité, on ne retrouve jamais l'Aluminium sous sa forme simple à l'état naturel. Il est toujours lié à d'autres éléments. On va le trouver sous la forme d'hydroxyde d'Aluminium et d'oxyde d'Aluminium ou alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dans la bauxite ainsi que sous la forme silicate dans l'argile et les micas. On peut également le trouver sous des formes hydrosolubles complexées aux nitrates, sulfates ou chlorures dans les matières organiques dissoutes.

L'Aluminium est l'un des éléments fondamentaux du sol car en plus de sa très grande teneur dans ce dernier (5 à 35 %), il assure plusieurs fonctions. En effet, l'Aluminium permet la

Bonne structuration du sol, la fixation des anions dans ce dernier et il est également en grande partie responsable de son acidité.

En plus d'être retrouvé dans les roches du sol, l'Aluminium est également un constituant des eaux. On le retrouve dans les eaux superficielles et souterraines des milieux fissurés (apporté dans l'argile), elle-même transportée par les eaux de ruissellement. Il est introuvable dans les eaux d'infiltrations et souterraines. Ceci est dû au pH des sols qui sont majoritairement compris entre 4 et 10, à ce pH l'Aluminium est complexé à des hydroxydes de mobilité variable. Pour les sols très acides ou soumis à d'importantes pluies acides qui permettent une dissolution des sels on trouve de l'Aluminium dans les eaux souterraines (Sonthonnax, 2014).

Suivant leurs origines, les eaux sont plus ou moins concentrées en Aluminium (Berthomier, 2019) :

- eau douce de surface :  $[Al] < 100 \mu\text{g/l}$
- eau de mer :  $[Al] < 1 \mu\text{g/l}$
- eau souterraine :  $[Al] < 100 \mu\text{g/l}$

### 3. Propriétés physico-chimiques

L'Aluminium a été découvert en 1808 par le chimiste anglais Davy. Il fallut attendre 1827 pour qu'un autre chimiste, Friedrich Wöhler, isole ce métal et met en évidence ses propriétés physiques et chimiques (Sonthonnax ; 2014). L'Aluminium est un métal gris argenté, brillant qui présente des propriétés physico-chimiques particulièrement intéressantes : basse densité, grande malléabilité, grande ductilité, bonne conductivité électrique et chimique, résistance à la corrosion, à la traction. Il est trois fois plus léger que l'acier. Il ne s'altère pas en contact de l'air en raison de la formation d'une couche protectrice d'alumine en surface, ce qui le rend très résistant à la corrosion de l'air mais aussi de l'eau. Il est en plus totalement recyclable (Medjdoul *et al.*, 2018).

### 4. Domaines d'utilisation

Les nombreuses propriétés physico-chimiques de l'Aluminium en font un métal très utilisé dans de nombreux domaines (INVS ,2003 ; Sonthonnax, 2014 et Santé Canada, 2019).

- Dans le traitement de l'eau potable, des eaux usées et des eaux industrielles. Dans le traitement de l'eau potable, des sels d'Aluminium sont appliqués pour éliminer la turbidité, les matières organiques et les micro-organismes.

- Dans le bâtiment, sous forme d'alliages avec d'autres métaux pour la fabrication des fenêtres, portes et gouttières.
- Dans les transports, également sous forme d'alliages pour des pièces automobiles, ferroviaires, maritimes, aéronautiques et aérospatiales.
- Dans l'ingénierie, pour la fabrication de composants électriques et d'objets électroniques (comme les ordinateurs, les téléphones portables).
- Dans la pharmacie, pour les solutions parentérales et les médicaments. Dans ces derniers, ces sels sont aussi bien utilisés comme principes actifs, dans les antiacides (ils diminuent l'acidité gastrique grâce à un effet tampon) et pansement gastro-intestinaux (ils adhèrent aux parois des muqueuses) que comme excipients ou adjuvants dans les vaccins (même si leur mécanisme d'action reste inconnu, ils stimulent la réponse immunitaire).
- Dans la chirurgie, dans des céramiques ou alliages pour la chirurgie dentaire et orthopédique.
- Dans la cosmétologie, pour les colorants capillaires, crèmes de soins corporelles, produits de rasage ou de maquillage pour le visage, les anti-transpirants et les dentifrices.
- Dans l'agroalimentaire, pour les ustensiles de cuisine, l'emballage mais aussi pour les colorants, les conservateurs ou les additifs.

**Partie II : Sources d'exposition à l'Aluminium****1. Introduction**

Bien qu'une prise de conscience des populations vis-à-vis des effets néfastes de l'Aluminium sur la santé commence à avoir lieu, la majorité des personnes ne connaissent pas les multiples voies par lesquelles elles sont exposées quotidiennement à ce polluant (Esquerre, 2016).

**2. Aluminium dans l'environnement**

La pollution générée par l'industrie de l'Aluminium est inquiétante car elle produit des millions de tonnes de gaz à effet de serre par an tels que le dioxyde de carbone et des gaz qui sont présents dans les pluies acides comme l'oxyde de soufre et l'oxyde d'azote. De plus, le processus de transformation de la bauxite en Aluminium nécessite de grandes quantités d'énergie et d'eau. Les mines de bauxite ont un impact environnemental très important sur le territoire. Étant des mines à ciel ouvert, l'impact sur l'environnement est plus grave que la mine souterraine, puisque les dommages sont en grande partie irréversibles. L'extraction de la bauxite érode le sol et élimine toute la flore, affectant également la faune de cet environnement. En plus de cela, cette activité est la cause indirecte de la déforestation de la zone près de la mine, car une fois créés les routes d'accès à la mine dans la campagne, généralement d'autres industries profitent de cet accès tels que l'industrie de menuiserie, les producteurs de charbon et d'autres activités qui contribuent à la déforestation des forêts ou des zones de la jungle. On a l'exemple des mines de bauxite en Jamaïque (détenue majoritairement par Kaiser, Alpart et Alcan), où Le Polvorín, seraient indirectement responsables de la déforestation qui a provoqué la détérioration de plus d'un tiers des bassins jamaïcains, le séchage la diversité des aquifères et la production de graves restrictions d'eau dans les villes ces dernières années. Il faut ajouter que la bauxite minière génère plusieurs conflits sur le territoire, car ils impliquent le déplacement de nombreux villages et la perte des modes de vie traditionnels, tels que la perte de plantes locales avec des utilisations médicinales, l'impossibilité de générer la culture, de sérieuses restrictions à la chasse ou à l'entretien du bétail (Ecoverre, 2018).

**3. Aluminium dans l'eau**

Dans l'eau, l'Aluminium peut se trouver sous trois formes : insoluble, colloïdale et soluble correspondant notamment à des silico-Aluminates, des hydroxydes, des formes libres ou complexes minérales ou organiques (figure 2). L'Aluminium se trouve en particulier dans les

Argiles ou dans des substances complexes comportant des acides humiques résultant de la dégradation de la matière végétale. Lors des traitements, notamment ceux de chloration, ces substances peuvent donner naissance à des composés organohalogénés tels les trihalométhanés (THM). (INVS, 2003).

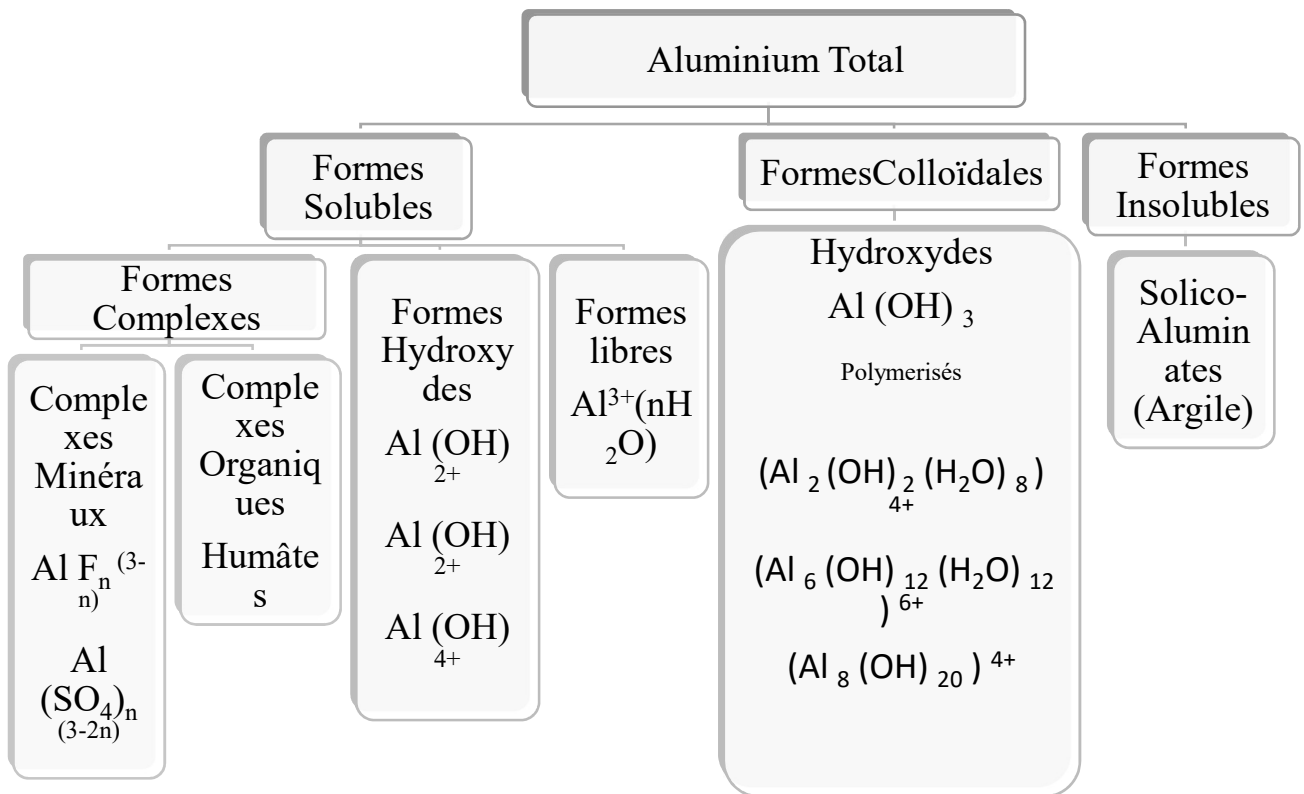


Figure 02 : Différentes formes d'Aluminium dans l'eau (Bourbas *et al.*, 2016).

Pour des pH acides (pH<5), l'Aluminium s'oxyde pour former l'ion  $Al (H_2O)_3^{3+}$ . Tandis que Pour des pH alcalins (pH>9), l'Aluminium au contact de l'eau subit des déprotonations successives pour former l' $Al(H_2O)_5(OH)^{2+}$ ,  $Al(H_2O)_4(OH)^+$ , de l'espèce  $Al(H_2O)_3(OH)$  et à la fin l'ion aluminate tétraédrique  $Al(OH)_4^-$  et de l'hydrogène (Karbouj, 2008).

Toutes les eaux contiennent de faibles quantités d'Aluminium. Dans les eaux à pH neutre, il est présent sous forme de composés insolubles, alors que dans les eaux fortement acides ou basiques, il peut être présent sous forme dissoute (E.A.A, 2015).

La population est principalement exposée aux composés trihalométhanes (THM) par ingestion d'eau potable. Ces composés (Chloroforme (TCM), Bromodichlorométhane (BDCM), Dibromochlorométhane (DBCM) et le Bromoforme (TBM)) peuvent également être absorbés par la peau lors d'un contact cutané avec l'eau ou encore être inhalés une fois qu'ils se sont volatilisé de l'eau. Des études épidémiologiques ont permis d'examiner le lien entre l'ingestion d'eau chlorée et l'augmentation de l'incidence du cancer de l'intestin, de la vessie, du cerveau, du rectum et du pancréas. Au regard des données épidémiologiques, les études portant sur le cancer de la vessie présentent la plus forte association entre l'augmentation de l'incidence de cancers et l'exposition à l'eau potable chlorée de surface. Dans une moindre mesure, d'autres études ont soulevé une possible association avec l'incidence du cancer du rectum (INSPQ, 2010).

### **3.1. Eau de robinet**

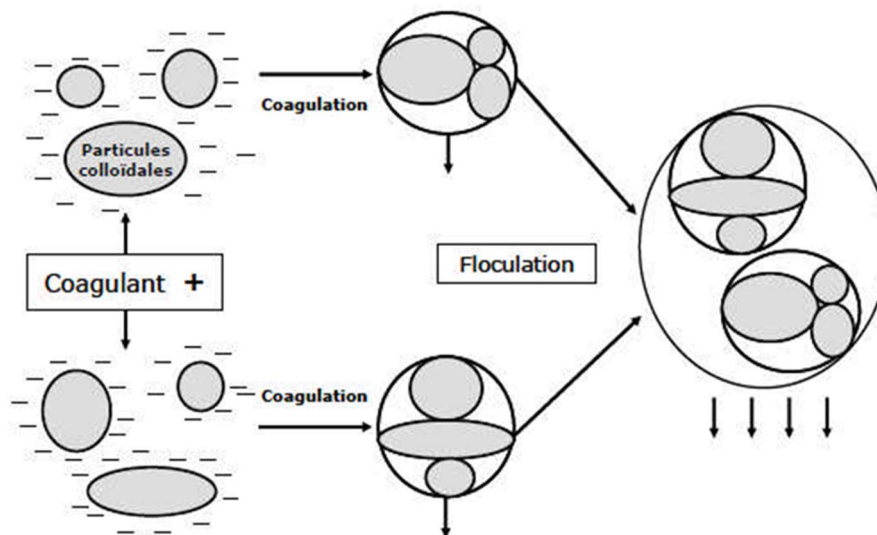
L'Aluminium présent dans l'eau peut avoir deux origines : Naturelle ou anthropique issue du traitement visant à transformer l'eau "brute" en "potable". En effet, afin d'obtenir une eau saine au robinet du particulier il est nécessaire de traiter l'eau. Ce traitement va consister, entre autres, en une étape de clarification. Cette dernière a pour but d'éliminer les matières en suspension et les colloïdes contenus dans l'eau (Sonthonnax, 2014).

L'Aluminium est un métal pauvre dont l'origine dans l'eau potable est principalement due aux traitements physico-chimique (coagulation). Au niveau du contrôle sanitaire, il doit satisfaire à une référence de qualité de 0.2 mg/l. L'OMS justifie l'absence de valeur guide basée sur des arguments sanitaires en raison des possibilités limitées d'utiliser les données obtenues en expérimentation animale comme modèle pour l'homme et de l'incertitude entachant les données humaines. La référence de qualité proposée tient compte des procédés de coagulation utilisant des agents coagulants à base d'Aluminium dans les installations de traitement. La référence de qualité dans l'eau de boisson de l'Aluminium est très polémique. En effet, beaucoup d'études internationales, convergent dans le même sens et prouvent qu'au-delà de 100 µg/l d'Aluminium dans l'eau du robinet, celui-ci deviendrait un co-facteur de la maladie d'Alzheimer. L'Aluminium est un neurotoxique avéré. Les expériences sur des animaux ont prouvé à plusieurs reprises son action toxique sur le système nerveux. Au vu de plusieurs résultats d'étude épidémiologique, beaucoup de toxicologue demandent que la norme sanitaire soit divisée par quatre (Julien, 2011).

### A. Coagulants et processus de coagulation

L'Aluminium peut être ajouté à l'eau brute sous forme de sulfate d'Aluminium ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) ou d'aluminate de sodium  $\text{Na Al}(\text{O})_2$ . C'est en effet un des réactifs utilisés pour le traitement de clarification des eaux de surface afin d'éliminer les matières colloïdales quand l'eau est colorée ou trouble (Cunat, 1999).

Les particules colloïdales en solution sont « naturellement » chargées négativement. Ainsi, elles tendent à se repousser mutuellement et restent en suspension, on dit qu'il y a stabilisation des particules dans la solution. La coagulation consiste à déstabiliser des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives. Pour ce faire on utilise des réactifs chimiques nommés coagulants. Les coagulants sont des produits capables de neutraliser les charges des colloïdes présents dans l'eau, le choix du coagulant pour le traitement de l'eau de consommation doit tenir compte de l'innocuité du produit, de son efficacité et de son coût. Le type de coagulant et la dose ont une influence sur : la bonne ou la mauvaise qualité de l'eau clarifiée ; le bon ou le mauvais fonctionnement de la floculation et de la filtration ; le coût d'exploitation, la figure 03 ci-dessous nous montre le principe du phénomène de coagulation-floculation (Achour *et al.* 2016).



**Figure 03** : Principe de la coagulation-floculation (Achour *et al.*, 2016).

Lorsque des coagulants à base d'Aluminium sont ajoutés à l'eau, des réactions chimiques se produisent avec les particules, ainsi qu'avec la matière organique naturellement présente dans

l'eau. La matière organique agit comme un ligand qui complexe les ions d'Aluminium chargés positivement, exerçant une demande de coagulant qui doit être surmontée avant que la floculation puisse se produire (Santé Canada, 2019).

Ce procédé de traitement entraîne très souvent, comparativement aux autres traitements, un apport non négligeable d'Aluminium résiduel dans l'eau traitée. L'Aluminium provenant de la consommation d'eau potable contribue seulement en faible proportion à l'apport quotidien total de la diète en Aluminium. Cependant, il peut contribuer d'une façon disproportionnée à la quantité totale d'Aluminium absorbé par le système digestif étant donné qu'il est sous une forme non complexée et donc plus disponible (Bisson *et al.*, 1992).

La majeure partie de l'Aluminium servant de coagulant est éliminée par déposition ou filtration sous forme de sels insolubles. Bien que le traitement de l'eau vise à diminuer autant que possible la teneur en Aluminium en optimisant les quantités utilisées, il en reste toujours un peu. On estime que dans 40 à 50 % des cas d'utilisation d'Aluminium comme agent coagulant, une augmentation de sa concentration dans l'eau traitée était observée (Cunat, 1999).

## **B. Evolution des directives par rapport à la concentration en Aluminium**

Concernant l'eau de distribution, la référence de qualité est fixée à 200 µg/l par le code de la santé publique ; cette valeur est considérée comme une référence de qualité correspondant à un indicateur d'efficacité de traitement. Cette position reprend les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé établies en 1994, 1998 et 2004 dans ses directives pour les eaux de boisson : l'OMS précise que compte tenu de "l'utilité limitée des données provenant de modèles animaux et de l'incertitude entourant les données recueillies chez l'Homme, il n'est pas possible actuellement d'établir une valeur guide fondée sur des critères de santé". En 2004, considérant d'une part les effets bénéfiques liés à l'utilisation des sels d'Aluminium comme réactif chimique lors de l'étape de coagulation et, d'autre part, les effets potentiels de l'Aluminium sur la santé, l'OMS fixe une limite pratique fondée sur l'optimisation du procédé de coagulation à l'aide de dérivés de l'Aluminium de façon à réduire au minimum la concentration dans l'eau traitée (E.A.A, 2015).

Il existe aujourd'hui une valeur guide (datant de 2011) de l'OMS pour le taux d'Aluminium présent dans l'eau de boisson, issue des stations de traitement des eaux qui est de 0,1 mg/l dans les grandes stations de traitement et de 0,2 mg/l dans les petites stations et qui se base sur l'optimisation pragmatique du procédé de traitement. Cette valeur guide est établie

essentiellement pour des raisons de goût et d'aspect. L'OMS ne propose pas de critère basé, sur la santé pour établir les taux acceptables d'Aluminium présent dans l'eau de boisson. La Commission européenne a adopté la même valeur guide qui est appliquée dans les Etats Membres (E.A.A, 2015). D'après le journal officiel de la république algérienne (tableau 01), l'Algérie à adopter les normes de l'OMS en ce qui concerne la teneur en Aluminium dans les eaux de boisson.

**Tableau 01** : Normes appliqués pour les paramètres chimiques de l'eau potable  
(Journal officiel de la république algérienne, 2014).

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 <sub>2</sub>	5	
	Acrylamide	µg/l	0,5	
	Antimoine	µg/l	20	
	Argent	µg/l	100	
	Arsenic	µg/l	10	

### 3.2. Eaux embouteillées

Les eaux embouteillées (eaux minérales naturelles ou eaux de sources) peuvent également contenir de l'Aluminium. Les eaux minérales naturelles sont des eaux qui ont une origine souterraine. Elles possèdent une relative stabilité dans leurs teneurs en oligo-éléments, minéraux et autres constituants. Ces eaux peuvent être embouteillées mais également utilisées dans un établissement thermal si des propriétés thérapeutiques leurs sont reconnues. Ces eaux ne peuvent en aucun cas être traitées et il faut une autorisation pour les exploiter. Les eaux de sources sont des eaux qui ont également une origine souterraine et qui comme les eaux minérales naturelles ne peuvent être traitées. Aucune eau embouteillée ne peut subir un

traitement par des agents de floculation. Il n'y a donc aucun ajout de sels d'Aluminium dans les eaux embouteillées. Comme pour l'eau du robinet d'un point de vue réglementaire, le seuil maximum d'Aluminium dans les eaux de sources et les eaux rendues potables par traitement à 0.2 mg/l, Pour les eaux minérales naturelles, aucune valeur limite n'a été définie (Sonthonnax, 2014).

#### **4. Aluminium dans les aliments**

La plupart des aliments contiennent naturellement moins de 0.5 mg d'Aluminium /100g de matière. Les aliments les plus riches en Aluminium sont les coquillages et certains aliments d'origine végétale comme le basilic, les épinards, les lentilles et surtout le thé qui accumule ce métal au niveau de ses feuilles et la levure alimentaire. Certaines épices et fines herbes, ont de hautes teneurs en Aluminium. En revanche, les viandes n'en contiennent que très peu (Karbouj, 2008).

La quasi-totalité de l'apport quotidien en Aluminium provient de sources naturelles. Lors de la révision du Comité d'Experts FAO/OMS sur les Additifs Alimentaires en 2011, l'apport hebdomadaire acceptable provisoire (Provisional Tolerable Weekly Intake - PTWI) pour l'Aluminium a été établi à 2 mg/kg de masse corporelle et concerne tous les composés d'Aluminium dans l'alimentation, y compris les additifs (E.A.A, 2015).

L'Aluminium peut également s'introduire dans la nourriture à partir des casseroles, des ustensiles de cuisine et des emballages. La migration de l'Aluminium à partir des emballages, des ustensiles et des conditionnements de boissons, dépend de la qualité du matériau (pureté de l'Aluminium), de l'existence d'un revêtement (plastique ou vernis), de la durée du contact auxquelles s'ajoutent le pH et la salinité de l'aliment, à pH compris entre 4 et 8, la migration est négligeable; à pH inférieur à 2, l'Aluminium est extrait du matériau (Cherifi, 2013).

#### **5. Aluminium dans les produits de santé**

##### **5.1 Médicaments**

L'Aluminium est principalement utilisé comme principe actif dans certains médicaments. De nombreux médicaments administrés par voie orale contiennent de l'Aluminium. C'est le cas notamment des anti-acides (tableau 02) qui font partie des médicaments les plus vendus en officine que ce soit sur ordonnance ou en automédication. Selon l'Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) des anti-acides, « dans le cadre des conditions normales d'utilisation, l'exposition reste modérée, en raison de la faible absorption de l'Aluminium contenu dans les

anti-acides » (environ 0,1%). Pourtant, la toxicité de l'Aluminium a été confirmée chez les insuffisants rénaux ou lors d'un usage prolongé ou à des doses massives. Aucune preuve n'a été évoquée, ni chez les patients ayant une fonction rénale normale, ni dans les conditions normales d'utilisation. Il faut donc s'en méfier, surtout chez l'insuffisant rénal. Or, les principales personnes à en utiliser sont les personnes âgées, qui le plus souvent ont une fonction rénale altérée (Batisse, 2014).

**Tableau 02** : Médicaments contenant de l'Aluminium (Personnel).

Médicament	Sel d'Al présent	Quantité d'Al présent par unité de prise (mg)
ACIDRINE®	Aminocétate d'aluminium	50
GASTROPULGITE®	Hydroxyde d'aluminium	108
GELOX®	Hydroxyde d'aluminium	225
MAALOX MAUX D'ESTOMAC®	Hydroxyde d'aluminium	211,76
ROCGEL®	Oxyde d'aluminium	641
TOPAAL®	Oxyde d'aluminium	16
XOLAAM®	Hydroxyde d'aluminium	211,76

## 5.2 Vaccins

L'Aluminium est présent dans certains vaccins en tant qu'adjuvant sous la forme d'hydroxyde d'Aluminium, de phosphate d'Aluminium ou d'hydroxyphosphate d'Aluminium. Le rôle d'un adjuvant dans un vaccin est de favoriser la réponse immunitaire, et certains vaccins ont besoin d'adjuvants pour être efficaces. Les vaccins contenant un adjuvant ont été en premier ceux contre la diphtérie, le tétanos, la coqueluche et les hépatites A et B (tableau 03). On a observé que ces vaccins n'étaient pas suffisamment efficaces lorsqu'ils étaient dépourvus d'adjuvant. Les seules réactions connues et que l'on pourrait éventuellement attribuer à l'Aluminium contenu dans les vaccins sont des réactions inflammatoires locales.

Tableau 03: Sels d'aluminium utilisés dans les vaccins (Merlo, 2014)

Formule chimique	Nom	Vaccins
$\text{Al(OH)}_3$	Hydroxyde d'aluminium	Diphtérie, Tétanos, Coqueluche, HBV, HAV
$\text{AlPO}_4$	Phosphate d'aluminium	
$(\text{Al})_2\text{PO}_4\text{SO}_4\text{OH}$	Sulfate d'aluminium hydroxy-phosphate	HPV

La quantité d'Aluminium présente dans les vaccins varie entre 0,3 et 1,5 mg par dose. Si l'on considère les différentes vaccinations et le nombre de rappels de vaccin, la dose maximale qu'une personne peut recevoir par cette voie au cours de toute sa vie est de 15 mg. Ceci correspond à la dose quotidienne absorbée par voie alimentaire pendant environ deux jours. L'Aluminium injecté par voies sous-cutanée ou intramusculaire est progressivement dissous et entre dans le flux sanguin. Il est ensuite éliminé par voie urinaire, comme c'est le cas pour l'Aluminium absorbé par l'appareil digestif (E.A.A, 2015).

### 5.3 Eau de dialyse

La dialyse chez les personnes en insuffisance rénale terminale réalise une situation quasi expérimentale d'exposition à l'Aluminium. Les apports en Aluminium sont essentiellement liés à sa présence dans l'eau utilisée pour la préparation du dialysat (à savoir l'eau du réseau de distribution, qui doit être traitée, le plus souvent par osmose inverse, pour devenir l'eau utilisée pour diluer les solutions concentrées pour hémodialyse) et à l'Aluminium contenu dans la poudre de bicarbonate. Une partie beaucoup plus faible est apportée par les concentrés acides eux-mêmes. De façon moins systématique, la prise d'hydroxyde d'Aluminium ( $\text{Al(OH)}_3$ ) prescrit par voie orale pour fixer les phosphates et éviter une hyperphosphorémie réactionnelle contribue à l'apport global en Aluminium (INVS, 2003).

### 5.4 Produits cosmétiques

L'Aluminium est souvent présent dans les cosmétiques : les déodorants et les antitranspirants (traités dans la partie précédente), les produits de soin du visage et du corps, les produits de maquillage et les démaquillants, les vernis à ongles, etc. Tous sont susceptibles d'en contenir.

Les laques aluminiques entrent également dans leur composition. D'autres dérivés naturels de l'aluminium, tels que le kaolin et les argiles peuvent eux aussi être utilisés comme excipients dans les cosmétiques. Cet élément est utilisé en cosmétique pour ses nombreuses propriétés intéressantes. Les fabricants s'en servent non seulement comme anti-transpirant, mais aussi comme abrasif dans les produits dentaires ou de soin du visage et du corps, agent de viscosité dans les produits de soin et de maquillage, durcissant dans les vernis à ongles, et absorbant dans les masques pour visage (Batisse, 2014).

## **6. Bilan de l'exposition à l'Aluminium**

Le tableau 04 résume à la fois l'exposition à l'Aluminium chez la population générale et chez les professionnels. Mais à lui seul, ce tableau ne permet pas de déterminer quelle est la source qui apporte le plus d'Aluminium à l'organisme. En effet, suivant le type de source, l'Aluminium sera absorbé différemment et donc ne contribuera pas de la même manière à la concentration d'Aluminium que l'on va retrouver dans le sang ou les organes. (Sonthonnax, 2014).

Tableau 04 : Bilan de l'exposition à l'Aluminium (Sonthonnax, 2014).

		Exposition non professionnelle				
		Air	Eau	Aliments	Cosmétiques	Produits de santé
Valeurs réglementaires	Exposition professionnelle	Il n'y a pas de valeur réglementaire	<p><u>Eau froide du robinet et eaux embouteillées (sauf minérales)</u> : <math>\leq 0,2</math> mg/L</p> <p><u>Eau chaude du robinet</u> : <math>\leq 0,5</math> mg/L</p>	DHTP : 1mg/kg de poids corporel/semaine	Il n'y a pas de valeur réglementaire, sauf pour le Zirconium anhydride et l'hydroxychlorure d'aluminium dont la concentration dans le produit ne doit pas excéder 20%	<p><b>Médicaments :</b> pas de valeur réglementaire</p> <p><b>Nutrition parentérale :</b> concentration plasmatique du patient <math>\leq 2</math> µg/kg/jour</p> <p><b>Produits de dialyse :</b> eau de dilution <math>\leq 10</math> µg/L, concentré acide <math>\leq 100</math> µg/L, soit un apport de 7,05 mg d'aluminium/semaine</p> <p><b>Vaccins :</b> 1,25 mg d'aluminium/dose</p>
	Valeurs constatées	<p>VME : 2 à 10 mg/m<sup>3</sup> d'air, en fonction du poste de travail</p> <p>A un temps t : 0,2 à 37,2 mg/m<sup>3</sup> d'air, en fonction du poste de travail</p>	<p><b>Eau au robinet :</b> variation suivant les types de sources et les modes de traitement, mais plus de 75% de l'eau distribuée est en moyenne inférieure à la valeur réglementaire. Ce qui revient à un apport quotidien (pour 1,2L consommation) compris entre 0,24 à 0,6 mg d'aluminium</p> <p><b>Eaux embouteillées :</b> toutes les sources (sauf Saint-Yorre) ont une teneur moyenne inférieure à celle réglementaire. Ce qui revient à un apport quotidien (pour 0,174 L consommées) compris entre 0,01 et 0,03 mg d'aluminium</p>	<p><b>Nourrissons :</b> 0,43 à 0,96 mg/kg de poids corporel/semaine</p> <p><b>Enfants :</b> 0,42 à 0,83 mg/kg de poids corporel/semaine</p> <p><b>Adultes :</b> 0,28 à 0,49 mg/kg de poids corporel/semaine</p>	<p>Exposition quotidienne moyenne de 0,428 mg/kg de poids corporel.</p>	<p><b>Médicaments :</b> 48 à 3846 mg/jour</p> <p><b>Nutrition parentérale :</b> en traitement aigu les 2/3 des patients on une concentration plasmatique comprise entre 2 et 5 µg/kg/jour. En traitement chronique, cette concentration est comprise entre 5 et 20 µg/kg/jour</p> <p><b>Produits de dialyse :</b> 1,87 mg d'aluminium/semaine</p> <p><b>Vaccins :</b> 0,17 à 0,82 mg d'aluminium / dose. Ce qui équivaut sur une vie (jusqu'à 65 ans) à un apport compris entre 5,96 et 17,9 mg d'aluminium</p>

**Chapitre II :**  
**Bioaccumulation et Toxicité**  
**de l'Aluminium**

## Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

---

### Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

#### 1. Cinétique de l'Aluminium dans l'organisme

La cinétique et le métabolisme de l'Aluminium sont conditionnés par la spéciation de l'Aluminium, le pH du milieu et l'affinité de l'élément pour certaines protéines de transport (transferrine, composés protéiques de bas poids moléculaire). L'influence de ces différents facteurs se traduit notamment par des demi-vies très différentes d'une espèce animale à l'autre (Conseil supérieure de la santé, 2015).

La forme libre de l'Aluminium ( $Al^{3+}$ ) se lie facilement à de nombreuses substances; par conséquent, c'est l'affinité avec le ligand et le sort métabolique du complexe qui détermine le métabolisme de l'Aluminium. Ce dernier peut former des complexes de faible poids moléculaire en se combinant à des acides organiques, des acides aminés, des nucléotides, des phosphates et des glucides assez stables. L'Aluminium peut également former des complexes macromoléculaires stables en combinaison avec des protéines, des polynucléotides et des glycosaminoglycanes. Certains complexes sont si stables que le cation Aluminium ne peut être échangé contre un autre cation. Comme l'Aluminium a une grande affinité avec ces ligands organiques, une grande partie de l'Aluminium présent dans l'organisme existe sous forme de complexes macromoléculaires (Santé Canada, 2019).

#### 1.1. Absorption de l'Aluminium dans l'organisme

Chez l'homme chacune des surfaces externes du corps (peau, le nez, les poumons et le tractus gastro-intestinal) représente une des principales voies d'absorption de l'Aluminium reconnues : voie orale, voie cutanée et la voie respiratoire (Exley, 2013).

#### A. Voie respiratoire

L'absorption de l'Aluminium par voie inhalée peut être considérée comme faible. En effet, dans l'air ambiant, l'Aluminium est souvent combiné à des particules peu solubles (comme les silicates) qui vont réduire son absorption systémique au niveau des alvéoles pulmonaires. De plus, la quantité d'Aluminium inhalée sera différente de celle que l'on va retrouver au niveau des alvéoles pulmonaires car le mucus et les cils présents au niveau du tractus respiratoire vont repousser vers le haut les particules contenant de l'Aluminium. Ces dernières

## Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

---

Seront ensuite mélangées à la salive puis dégluties. On peut donc dire qu'une partie de l'Aluminium inhalé Passera au final par le système digestif. Une fois dans le tractus digestif, ces particules pourront soit être absorbées, soit être directement éliminées dans les selles en moins de 24 heures. Mais L'Aluminium qui est inhalé pourrait également, selon une étude publiée en 1996 par le Dr Exley, être absorbé au niveau du système olfactif et atteindre le cerveau grâce à un transport axonal. Au niveau du poumon, la quantité d'Aluminium que l'on va retrouver va dépendre de la durée et du niveau d'exposition, du volume d'air inhalé, de la taille et de la solubilité des particules. Selon une étude réalisée par Priest en 1998 près de 45% de l'Aluminium qui s'est déposé au niveau des alvéoles pulmonaires est éliminé en moins de 24 heures par différents mécanismes comme la toux, la clairance alvéolaire et l'action mucociliaire. De plus, seulement 4,5% du dépôt pulmonaire serait réellement absorbé et pénétrerait dans la circulation sanguine. Une fois dans le sang, la très large majorité de l'Aluminium serait directement éliminée par l'organisme et au final seulement 0,2% de l'Aluminium qui s'est déposé au niveau des poumons resterait dans le corps (INVS, 2003).

### B. Voie orale

Les principales sources d'absorption orale de l'Aluminium sont les aliments, en raison de son utilisation dans les additifs alimentaires, les emballages d'aliments et de boissons et les ustensiles de cuisine, l'eau potable (utilisation dans le traitement des eaux municipales) et les médicaments contenant de l'Aluminium en particulier les antiacides (ATSDR, 2008). L'absorption de l'Aluminium par voie orale est influencée par plusieurs facteurs : le pH, la dose administrée, la spéciation (c'est-à-dire le type de sel formé) et la physiopathologie du sujet. Par exemple, l'absorption d'Aluminium semble plus élevée chez les patients atteints d'insuffisance rénale, d'urémie ou bien d'entéropathie. L'âge constitue également un facteur de variabilité de son absorption, qui augmenterait aux âges extrêmes de la vie. Ainsi, chez les nourrissons et les personnes âgées, l'absorption digestive est plus importante que chez les adultes. Cette modification d'absorption serait liée à une augmentation de la perméabilité de la paroi intestinale. L'absorption de l'Aluminium par voie orale est très faible, comprise entre 0,1 et 1%. Les médicaments ont quant à eux une absorption 10 à 100 fois plus faible, comprise entre 0,001 et 0,1%. Les aliments, au vu des quantités ingérées, représentent 95% des apports quotidiens en Aluminium par voie orale (Sonthonnax, 2014).

## Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

---

### C. Voie cutanée

La voie cutanée représente une part importante de l'apport quotidien en Aluminium. L'exposition quotidienne à l'Aluminium est de 428 µg/kg de poids corporel. Il a été mis en évidence que l'absorption cutanée de l'Aluminium va varier en fonction du type de peau. Elle sera beaucoup plus importante pour une peau lésée que pour une peau saine. Ainsi, pour ce dernier type de peau la biodisponibilité sera de 0,5% alors que pour une peau lésée elle sera de 18%. Cela conduit donc à une absorption systémique quotidienne comprise entre 2,1 et 77 µg/kg de poids corporel (AFSSAPS, 2011).

### D. Voie Intramusculaire

La voie intramusculaire (IM), par l'intermédiaire de la vaccination, est également une voie d'exposition à l'Aluminium. L'absorption systémique des adjuvants par voie IM a été peu étudiée chez l'homme pour le moment. Les résultats trouvés dans la littérature sont des extrapolations des valeurs obtenues chez les animaux. Les vaccins du calendrier vaccinal contiennent une dose d'Aluminium réglementaire inférieur à 0,85mg/dose. La cinétique comparée entre Aluminium ingéré et Aluminium injecté est bien étudiée et elle indique que par voie digestive l'Aluminium de l'alimentation courante est très peu absorbé tandis qu'administré par voie sanguine il se concentre principalement dans l'os, alors que sa présence dans le cerveau est en très faibles quantités (Bégué *et al.*, 2012).

### 1.2. Distribution de l'Aluminium dans l'organisme

L'Aluminium est principalement retrouvé dans le plasma, en grande majorité lié à la transferrine. Il est naturellement présent dans les tissus (30 à 50 mg/kg pc), la moitié dans le squelette et environ un quart dans les poumons. Il est aussi retrouvé, en quantités moindres, dans les muscles, la rate, le foie, le cerveau, le cœur, les reins, les ganglions lymphatiques ou les glandes surrénales. Sa présence dans le cerveau résulte de son passage à travers l'épithélium Nasal et d'un transfert axonal (figure 04). L'Aluminium est aussi capable de traverser la barrière placentaire et a été détecté dans le lait maternel (INRS, 2014).

## Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

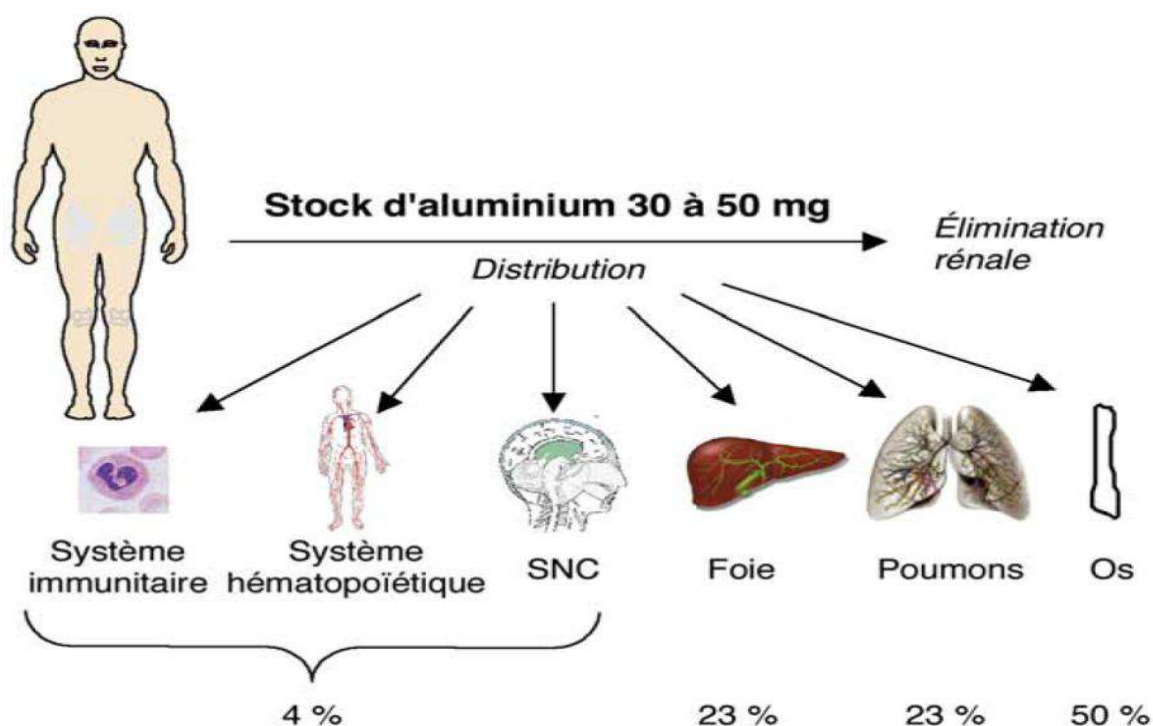


Figure 04 : Distribution de l'Aluminium dans l'organisme (Sonthonnax, 2014).

### 1.3. Élimination de l'Aluminium

Après son ingestion chez l'homme, l'Aluminium absorbé par le sang est principalement éliminé par les reins, vraisemblablement sous forme de citrate, et excrété dans l'urine. L'Aluminium non absorbé est excrété dans les fèces. L'excrétion par la bile constitue une voie secondaire mais mineure (EFSA ; 2008). La demi-vie de l'élimination de l'Aluminium absorbé dépend de la durée d'exposition mais aussi de sa redistribution à partir des sites de stockage ; elle serait triphasique avec une demi-vie urinaire d'environ 7 heures, une de quelques semaines et une demi-vie de plusieurs mois voire années selon l'ancienneté de l'exposition et le type d'exposition (INRS ; 2014). Ainsi, la cinétique de l'élimination se décompose en trois phases successives. Lors de la première phase, la demi-vie d'élimination est de 8 heures (cela correspond à l'aluminium situé dans le sang). Lors de la deuxième phase, qui correspond à l'élimination de l'aluminium présent dans les tissus, la demi-vie passe à plusieurs semaines. Et pour terminer, la demi-vie de la troisième phase (élimination de l'aluminium osseux) est généralement supérieure à un an (Sonthonnax, 2014).

## Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

---

### 2. Toxicité de l'Aluminium

L'Aluminium aurait un pouvoir toxique pour l'Homme. Certaines études montrent que, cette toxicité est relative et s'observerait uniquement chez des sujets particuliers et exposés à de fortes doses. D'autre, soutiennent que ce métal omniprésent dans notre quotidien posséderait une toxicité au long cours, même pour des sujets exposés à des faibles doses. L'Aluminium représenterait donc un risque sanitaire pour l'ensemble de population (Esquerre, 2016).

#### 2.1 Toxicité aiguë

La toxicité aiguë correspond à une toxicité causée par de fortes concentrations de toxique sur une période très brève. Chez l'homme, il y a peu de cas de décès par ingestion d'une importante quantité d'Aluminium. Les cas recensés sont liés à des ingestions volontaires (suicides) ou accidentelles de pesticides (présence de phosphore d'Aluminium). Dans ces cas-là, ce n'est pas directement l'Aluminium qui a été mis en cause, mais le gaz phosphine produit au niveau gastro-intestinal. La réelle toxicité de l'Aluminium va donc s'observer dans le cadre d'expositions chroniques (Sonthonnax, 2014).

#### 2.2 Toxicité chronique

Les premiers signes de toxicité liés à une exposition chronique à l'Aluminium ( se traduit par une altération de la parole, une confusion mentale, des myoclonies<sup>5</sup> allant jusqu'à des convulsions, ainsi qu'une démence) ont été révélés en milieu professionnel et chez les patients insuffisants rénaux et hémodialysés. Par la suite, des études portant sur la population générale et principalement axées sur le risque neurologique ont été mises en œuvre (AFSSA, 2005).

##### 2.2.1. Effets neurologiques

###### A. Encéphalopathie

Les malades atteints d'insuffisance rénale éliminent difficilement l'Aluminium accumulé dans leurs organes. Lorsqu'ils sont dialysés leur sang peut se charger de l'Aluminium contenu dans l'eau de dialyse. Cette intoxication peut entraîner une démence appelée « la démence des dialysés » ou Encéphalopathie. Chez ces patients, les symptômes neurologique peuvent débiter par une simple perte d'audition pour les thons aigus déficit très fréquent chez les dialysés. Après un certain temps d'autres troubles peuvent apparaitre, comme les trouble psychiatriques consistant en délires, dépression sévère et démence. Dans le cerveau des Patients dialysés décédés d'encéphalopathie on peut retrouver jusqu'à 15,9 µg d'Aluminium par gramme de

## **Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium**

---

tissu. Cette valeur est près de 4 fois plus élevée que celle retrouvée dans le cerveau des patients dialysés ne présentant pas d'encéphalopathie. L'encéphalopathie est la pathologie qui a révélé le potentiel toxique de l'Aluminium (Pilette, 2008 et Sonthonnax, 2014).

### **B. Maladie d'Alzheimer**

La maladie d'Alzheimer est connue pour l'un des symptômes qu'elle engendre : la perte de mémoire. Mais elle ne se résume pas à ce simple déficit cognitif. La maladie d'Alzheimer est une démence neurodégénérative progressive dont les troubles sont multiples. La maladie d'Alzheimer, c'est une vingtaine de millions de personnes atteintes dans le monde en 2010.

Il est important de comprendre que la maladie d'Alzheimer n'affecte pas tous les patients de la même manière. Plus on développe la maladie de façon tardive dans sa vie, plus elle semble lente et chronique, et Plus on la développe jeune, plus elle va affecter rapidement l'ensemble du cerveau, entraînant de nombreux troubles majeurs (LECMA-Vaincre Alzheimer, 2005).

Si les causes de cette maladie restent inconnues, nous savons que l'ajout d'Aluminium à l'alimentation ou à l'eau exacerbe les nombreux symptômes de la maladie d'Alzheimer chez ces modèles animaux. Chez la majorité des individus, le vieillissement est peut-être le facteur de risque le plus important pour le développement de la maladie d'Alzheimer et de même, le vieillissement est également le critère le plus critique de l'accumulation d'Aluminium dans les tissus cérébraux humains. Les neurones ont été décrits comme la «lignée cellulaire immortelle par excellence», et c'est leur longévité qui les prédispose à accumuler de l'Aluminium au fil du temps (Exley, 2017)

#### **2.2.2 Effets Immunitaires**

##### **A. Sclérose en plaques SEP**

La sclérose en plaques(SEP) est une maladie auto-immune avec des conséquences neurologiques dévastatrices dont les causes restent inconnues. Bien qu'il y ait eu des progrès dans la compréhension de la pathogenèse de la SEP, cela reste extrêmement lent. Il est largement admis que la SEP implique à la fois des facteurs génétiques et environnementaux Agissant isolément ou ensemble dans divers phénotypes de la maladie. L'exposition humaine à l'Aluminium a été identifiée comme un contributeur possible à la SEP, Il a été démontré que les personnes atteintes de SEP avaient une charge corporelle plus élevée que prévu en

## Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

---

Aluminium, Ce dernier se manifestait par des concentrations très élevées d'Aluminium dans les urines. La contribution de l'Aluminium dans la pathogenèse de la SEP et la progression de la maladie est actuellement inconnu mais il pourrait être lié à l'activité de l'Aluminium en tant que pro-oxydant ou comme adjuvant capable d'induire une forme d'auto-immunité dans les tissus affectés. Ces deux mécanismes potentiels de toxicité de l'Aluminium ont des implications sur la dégradation de la myéline dans la SEP. Les femmes ont une teneur plus élevée en Aluminium dans leur urine que les hommes, ce qui suggère une charge corporelle plus élevée en Aluminium chez les femmes. L'incidence de la SEP est également plus élevée chez les femmes, ce qui peut suggérer que la charge corporelle de l'Aluminium prédispose les femmes à la maladie (Jones *et al.*, 2017).

### B. Myofascites à macrophages

La Myofascite à macrophages (MFM) est une pathologie émergente qui se caractérise par des lésions musculaires spécifiques attestant d'une persistance anormale d'hydroxyde d'Aluminium dans les macrophages suite à une vaccination. Des travaux réalisés à Créteil et à Bordeaux entre 1998 et 2001 ont identifié l'hydroxyde d'Aluminium contenu dans les vaccins comme étant le facteur causal des lésions de cette maladie. L'analyse par microscopie électronique des échantillons de biopsie prélevés sur 40 patients consécutifs ont montré que la présence constante d'inclusions de spicules à l'intérieur des macrophages, identifiés comme étant des cristaux d'hydroxyde d'Aluminium. Les lésions de MFM ont été observées uniquement dans les muscles deltoïdes chez l'adulte et dans les quadriceps chez l'enfant, deux sites de vaccination Classiques, ce qui corrobore l'hypothèse d'une accumulation locale de l'Aluminium suite à une vaccination (Rigolet *et al.*, 2014).

#### 2.2.3 Effets cancérigènes

Les effets cancérigènes de l'Aluminium ont principalement été rapportés chez les professionnels. Dans la population générale, des études se sont intéressées aux effets cancérigènes de l'Aluminium uniquement par voie cutanée. L'impact des autres voies d'exposition n'a pour l'instant pas été étudié pour la population générale. Chez les professionnels de l'Aluminium, les études réalisées depuis les années 70 mettent en évidence plusieurs zones cancéreuses. Les plus fréquemment observées se situent au niveau du poumon et de la vessie. Chez les travailleurs du secteur de la production primaire, les études de cohorte montrent une augmentation du risque de cancer de la vessie de 1,7 et du risque de cancer du

## Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

---

poumon de 2. Même si lors des études, l'Aluminium n'était pas le seul élément susceptible d'induire les cancers observés, le CIRC (centre international de recherche contre le cancer) a décidé en 1987 de placer le processus de production de d'Aluminium comme cancérigène certain pour l'homme (catégorie 1). Mais l'OMS en 1997 et l'ATSDR (Agency for toxic substances and disease registry) ont conclu qu'au vu des connaissances actuelles, on ne pouvait pas considérer l'Aluminium comme un toxique cancérigène et que le risque accru de cancer chez les travailleurs de l'industrie de production d'Aluminium était lié à la présence d'autres éléments cancérigènes (notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)) (Sonthonnax, 2014).

En 2012, le Comité scientifique européen pour la sécurité des consommateurs (CSSC) a affirmé que « l'Aluminium des cosmétiques n'était pas susceptible d'être cancérigène ». Or une nouvelle étude sortie en septembre 2016 dans l'International Journal of Cancer par deux chercheurs genevois relance le débat et tend à prouver que les sels d'Aluminium présents dans les anti-transpirants augmenteraient le risque de cancer du sein. Une autre étude menée à Innsbruck en Autriche démontre un risque multiplié par deux de cancer du sein chez les femmes qui affirment avoir utilisé régulièrement des produits cosmétiques contenant des sels d'Aluminium. Dans un contexte épidémiologie où le cancer du sein est en augmentation et touche des femmes de plus en plus jeunes (20 % des femmes sont diagnostiquées avant 50 ans), il nous semble être de bon ton d'appliquer le principe de précaution et de se pencher sur une Interdiction. Rappelons que le principe des sels d'Aluminium est de boucher les pores et d'empêcher la transpiration de s'évacuer. Il est déjà prouvé qu'en cas de lésion (rasage, griffure, épilation, eczéma), la quantité de sels d'Aluminium qui pénètre dans l'organisme est six fois supérieure, raison pour laquelle leurs utilisation est proscrite dans ce genre de cas. Un rapport de l'agence française de sécurité sanitaire des produits de santé préconise même une concentration maximale de 0,6% alors que celle-ci n'est jamais affichée et serait de l'ordre de dix fois supérieur (Secrétariat du grand conseil, 2018).

### 2.2.4 Autres Effets

L'Aluminium pourrait également provoquer des effets sur la sphère osseuse, respiratoire et sur les fonctions de reproduction. Ces effets, en raison de leur survenue moins fréquente dans la population (impact moins important en terme de santé publique) le nombre d'études publiées dans la littérature est faible (Sonthonnax, 2014).

## Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

---

### A. Effets Osseux

Un dépôt excessif d'Aluminium au niveau des os peut altérer et diminuer la minéralisation et le remodelage osseux suite à une activité cellulaire réduite. Ceci résulte de dépôts d'Aluminium au niveau de la jonction entre l'os calcifié et l'os non calcifié, constituant un obstacle à la fixation du calcium dans l'hydroxyapatite, principal constituant des os. Les patients présentent alors un syndrome appelé « Aluminium Induced Bone Disease » (AIBD) qui se traduit soit par une ostéomalacie (décalcification osseuse due à un défaut de minéralisation du squelette) ; soit par une maladie osseuse adynamique (« Aluminium bone disease » ABD), entraînant une diminution de la fabrication du tissu osseux. Ces pathologies sont le plus souvent observées chez les insuffisants rénaux, ou encore chez les prématurés exposés à l'Aluminium via la nutrition entérale. Dans la description des cas d'AIBD, la majorité des patients présentaient une ostéomalacie. Les premiers cas d'AIBD ont été observés chez des sujets insuffisants rénaux dialysés dans la région de Newcastle. Ces patients présentaient des fractures et/ou des douleurs osseuses et musculaires et des lésions typiques de l'ostéomalacie ont été détectées à la biopsie osseuse. Ces symptômes étaient associés à une surcharge en Aluminium au niveau plasmatique et osseux. Le rôle de l'Aluminium contenu dans le liquide d'épuration extra-rénale a rapidement été mis en cause dans cette atteinte osseuse (Dietrich, 2017).

Chez les insuffisants rénaux dialysés, la diminution des cas observés ces dernières années est sûrement corrélée à la baisse des teneurs en Aluminium dans les solutés de dialyse. Cela suggère donc que le risque osseux dans cette population est de nos jours probablement très faible (Sonthonnax, 2014).

De même, l'accumulation des apports d'Aluminium administrés aux nouveau-nés prématurés via les solutions de nutrition parentérale au niveau osseux est à prendre en compte. En effet, cette accumulation d'Aluminium chez les nouveau-nés serait associée à une diminution de la masse osseuse au niveau des hanches et des lombaires à l'adolescence et représenterait un facteur de risque de survenue d'ostéoporose et de fracture de hanche à l'âge adulte (Dietrich, 2017).

### B. Effets Respiratoires

La responsabilité de l'Aluminium a été établie dans un seul syndrome respiratoire appelé fibrose pulmonaire ou « aluminose pulmonaire ». Celle-ci a été décrite pour la première fois en

## Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium

---

1947 chez des ouvriers travaillant dans les fours des fonderies de bauxite. Puis elle a été relevée lors d'expositions massives à l'Aluminium, soit sous forme de poudre, dans la fabrication de poudre à base d'Aluminium ou sous forme de vapeurs lors de soudages à l'arc de l'Aluminium. La présence de particules d'Aluminium en grande quantité a été confirmée par lavage broncho-alvéolaire (Dietrich, 2017).

### C. Effets sur la Reproduction

Une détérioration de la qualité du sperme humain a été observée au cours des dernières décennies. Une explication possible pourrait être une exposition accrue aux polluants environnementaux, y compris l'Aluminium. Une récente étude parue en octobre 2014 dans la revue *Reproductive Toxicology* a retrouvé d'importantes quantités d'Aluminium dans le sperme de plusieurs hommes. Cette étude réalisée par Dr Exley en collaboration avec des chercheurs français (CHU de Lyon et de Saint-Etienne) a mesuré la concentration d'Aluminium dans le sperme de 62 hommes français ayant déjà consulté pour des problèmes d'infertilités. Les résultats ont révélé des concentrations très élevées (surtout par rapport à celles habituellement retrouvées dans les liquides biologiques ou les tissus) d'Aluminium dans le sperme de ces sujets. Les concentrations d'Aluminium les plus élevées ont été retrouvées chez les patients présentant une concentration anormalement basse de spermatozoïdes dans leur sperme (oligospermie). Cependant, aucune relation significative n'a été relevée entre les concentrations en Aluminium dans le sperme de ces hommes et la diminution de mobilité et de vitalité des spermatozoïdes.

A la fin de leur étude, les auteurs soulignent qu'au vu des résultats obtenus et du faible nombre de sujets observés, il est difficile de conclure avec certitude du lien entre l'Aluminium et la baisse de fertilité observée chez ces hommes. Mais selon eux, il est nécessaire de poursuivre les études car l'augmentation de l'exposition à l'Aluminium ces dernières décennies et la baisse de la fertilité masculine dans les pays industrialisés sur la même période sont deux éléments forcément liés (Klein *et al*, 2014).

### D. Effets hématologique

Les études menées sur la toxicité hématologique de l'Aluminium ont montré que les sujets insuffisants rénaux (problème pour l'élimination de l'Aluminium) et les sujets dialysés (apports en Aluminium supérieurs à la population générale) sont tout particulièrement concernés. On observe chez certains d'entre eux une anémie microcytaire hypochrome toujours associée à une concentration sérique en Aluminium élevée. Cette anémie est réversible en arrêtant l'exposition

## **Chapitre II : Bioaccumulation et toxicité de l'Aluminium**

---

ou en utilisant un traitement par Déféroxamine par exemple. Les expérimentations réalisées chez l'animal ont permis de démontrer que la toxicité de L'Aluminium se faisait sur les globules rouges circulants mais aussi sur le métabolisme cellulaire ferrique dans les progénitures de ces derniers. Aucune toxicité hématologique n'a été observée chez les individus présentant une fonction rénale normale (Babin, 2016).

# **Discussion et Perspectives**

### 1. Discussion

La littérature a démontré l'importance de l'Aluminium comme matériau dans plusieurs domaines, Elle a aussi fait apparaître son implication dans diverses pathologies, aiguës ou chroniques, notamment des maladies neurologiques graves qui pourraient être liées avec l'exposition répétée à l'Aluminium à faible dose. Dans cette étude nous avons examiné certaines des questions fondamentales qui définissent actuellement notre compréhension de la toxicologie de l'Aluminium chez l'homme, comme par exemple son utilisation dans le domaine du traitement de l'eau. Il existe une vaste littérature sur ce sujet, et notre objectif est de l'utiliser pour développer notre compréhension de la toxicocinétique de l'Aluminium. Malgré l'abondance d'Aluminium dans l'environnement, il est généralement admis que cet élément n'est pas nécessaire aux systèmes biologiques et ne contribue à aucun processus biologique essentiel (Exley, 2013). En effet lors d'une contamination accidentelle d'approvisionnement d'eau à Camelford (Lowermoor Incident Health Advisory Group, Royaume-Uni, 1989), 20 tonnes de sulfate d'Aluminium ont été rejetées par la South West Water Authority dans l'eau potable fournie à une grande région de North Cornwall où 20 000 personnes ont été exposées à des concentrations d'Aluminium qui étaient de 500 à 3 000 fois supérieur à la limite acceptable en vertu de la législation de l'Union européenne (0.2 mg / l) et de l'OMS. Des cas de nausées, de vomissements, de diarrhées, d'aphtes, d'ulcères cutanés, d'éruptions cutanées et de douleur arthritique de courte durée ont été signalés chez ces personnes suite à cette exposition aiguë. Parmi ses personnes, une femme alors âgée de 44 ans, a été exposée, pendant plusieurs semaines, à des concentrations élevées d'Aluminium. Quinze ans plus tard, la femme, alors âgée de 58 ans, a été renvoyée pour enquête sur la détérioration de son état mental, qui remontait à plusieurs mois. Elle avait développé des difficultés à trouver des mots, des problèmes de calculs simples et une tendance accrue aux hallucinations visuelles. Elle s'est également plainte de maux de tête. À l'examen, elle était incapable de nommer des objets ou d'exécuter des commandes très simples. Elle a continué à se détériorer et est décédée en avril 2004 (Exley et Esiri, 2006). En ce qui concerne les expositions à plus long terme, Il existe une solide documentation sur la toxicité de l'Aluminium et ses différents effets avérés chez l'homme. Ci-dessous on citera les plus importantes :

Pour l'encéphalopathie, dans une étude publiée en 1978, Dunea et ses collaborateurs ont décrit 20 cas d'encéphalopathies chez des dialysés de 1972 à 1975. Ils se sont rendu compte que l'origine de ces encéphalopathies était liée au changement de processus de traitement de l'eau potable de la ville de Chicago. Ce changement est intervenu en juin 1972, et le début des signes

d'encéphalopathies a eu lieu chez certains dialysés en septembre 1972. Le traitement de l'eau avant juin 1972 associait du sulfate d'Aluminium et du sulfate de fer. Lors du changement, le traitement n'utilisait plus que du sulfate d'Aluminium en quantité plus élevée. Ainsi les concentrations en Aluminium utilisées dans l'eau de dilution pour la dialyse passèrent de 0-150 µg/L à 100-400 µg/L. La survenue de cette "épidémie" d'encéphalopathies chez ces patients dialysés est donc bien liée à l'augmentation de leur exposition à l'Aluminium (Sonthonnax, 2014).

En population générale, aucune publication n'a signalé de cas d'encéphalopathie liés à l'ingestion d'Aluminium, y compris lors de traitements oraux par anti-acides contenant de l'Aluminium ou lors de circonstances accidentelles. Par ailleurs, les doses cumulées d'Aluminium ayant conduit à l'observation d'encéphalopathie chez les sujets dialysés sont bien supérieures aux doses susceptibles d'être reçues par voie alimentaire. Ces éléments permettent d'être confiant sur l'absence d'excès de risque d'encéphalopathie par ingestion d'Aluminium pour la population (INVS, 2003).

En ce qui concerne la maladie d'Alzheimer, des études épidémiologiques se sont intéressées à l'Aluminium en tant que potentiel facteur de risque de maladies neurodégénératives, et plus particulièrement de la maladie d'Alzheimer. La relation entre l'Aluminium et la maladie d'Alzheimer a en fait été établie lorsque différentes études ont rapporté que ce métal, injecté en intracérébral, induisait la formation de dégénérescences neurofibrillaires dans le cerveau de différents animaux. Ces dégénérescences ressemblaient à celles observées dans le tissu cérébral de patients décédés de la maladie d'Alzheimer (Karbouj, 2008).

Des investigations plus poussées ont permis de préciser que ce métal s'accumulait plus particulièrement au niveau des neurofibrilles constituant les dégénérescences neurofibrillaires (Exley et Esiri, 2006).

En 2000, l'étude PAQUID menée par une unité de l'INSERM sur les départements de la Gironde et de la Dordogne concluait que selon le taux d'Aluminium dans l'eau potable (mais inférieur aux normes européennes), on pouvait avoir deux fois plus de risque de développer la maladie d'Alzheimer. Comme de nombreux toxicologues, Henri Pézerat demande que l'application immédiate d'une division par 4 de la norme sur le taux d'Aluminium dans les réseaux publics d'eau potable. En pointe dans ce combat, le scientifique écrivait déjà en 2004 : " Plusieurs études épidémiologique, dans six pays différents, ont conclu à une augmentation notable de l'incidence de la maladie d'Alzheimer en relation avec une concentration trop importante de l'Aluminium

dans l'eau de boisson. Dans notre alimentation quotidienne, 5% seulement de l'Aluminium que nous consommons provient de l'eau. Ces derniers passent intégralement la barrière intestinale et présentent de ce fait une biodisponibilité supérieure aux autres 90 %. Compte tenu de l'état général des connaissances, il serait judicieux d'optimiser le traitement et la distribution de l'eau (AMESSI, 2008).

Quant à la sclérose en plaque (SEP), Le lien entre l'Aluminium et cette maladie a été suggéré la première fois en 2004 dans une étude menée par Hernan. Selon lui, l'Aluminium présent dans les vaccins contre l'hépatite B serait responsable de l'apparition des SEP "post vaccinales" observées quelques années après la vaccination. D'après ses observations, le risque de développer une SEP serait 3,1 fois plus élevé trois ans après la vaccination contre l'hépatite B (Sonthonnax, 2014).

Quelques années après, Exley a relancé le débat puisque dans une étude réalisée en 2006, il a observé une excrétion urinaire d'Aluminium très élevée chez des patients atteints de SEP. Chez certains d'entre eux, cette valeur pouvait atteindre jusqu'à 40 fois la valeur des témoins. Cette élévation est notamment observée dans la phase récurrente-rémittente de la maladie (Exley, *et al.*, 2006)

Si l'accumulation du fer dans le cerveau des sujets atteints de SEP a déjà été constatée dans plusieurs études, ce n'est pas le cas de l'Aluminium. Cependant, Exley cite dans sa publication plusieurs études qui ont observé que chez l'animal, l'aluminium pouvait agir sur les oligodendrocytes et le métabolisme du fer. Lors d'intoxications massives à l'Aluminium, une importante démyélinisation des neurones est même observée.

Bien que ces résultats montrent que chez l'animal une intoxication à l'Aluminium pourrait avoir un impact sur le mécanisme qui est en cause dans la SEP, il n'existe pour l'instant aucune étude qui retranscrit ce phénomène chez l'être humain (Sonthonnax, 2014).

Pour sa part, Le rapport "Aluminium et vaccins" publié le 11 juillet 2013 par le HCSP (Haut Conseil de la Santé Publique) présente une analyse statistique descriptive sur 417 patients atteints de Myofasciite à macrophages (MFM). Ces derniers correspondent aux 269 cas avérés de MMF, auxquels on a ajouté 150 cas (81 cas jugés "douteux" au cours de cette même enquête et 69 cas où même si l'on n'avait pas le compte rendu anatomopathologique, on pouvait considérer la biopsie comme positive). Cette analyse descriptive met en évidence plusieurs éléments. Tout d'abord, les patients atteints de MFM sont majoritairement des femmes (plus de 65% des cas) et plus de 69% des sujets ont été vaccinés lors de la campagne contre le virus de

l'hépatite B au cours des années 90. Ensuite, l'âge moyen des patients au moment de la dernière vaccination (contenant de l'Aluminium) est de 40 ans. De plus, dans ce rapport on observe que seulement 2 cas de MFM ont été rapportés chez les enfants (au total 35 cas ont été rapportés dans le monde). Ceci n'est pas en faveur de la responsabilité de l'Aluminium dans la MFM car les enfants et les nourrissons correspondent aux deux catégories de population qui sont les plus exposées aux vaccins. L'analyse statistique faite dans ce rapport montre également que l'ensemble des patients décrivent la survenue des symptômes en moyenne 18 mois après leur dernière vaccination Aluminium (Haut conseil de la sante publique, 2013).

Les mêmes observations ont été réalisées chez des singes vaccinés par un vaccin DT adjuvé à l'hydroxyde d'Aluminium ou au phosphate d'Aluminium. La période d'étude fut plus longue : sacrifices à trois, six et douze mois. La lésion de type MFM est observée jusqu'à trois mois après l'injection pour le phosphate d'Aluminium et jusqu'au douzième mois (voir plus puisque l'étude ne se poursuit pas au-delà) pour l'hydroxyde d'Aluminium. Cette différence s'explique par la dissolution moins rapide de l'hydroxyde d'Aluminium est donc sa plus grande persistance au point d'injection (Babin, 2016).

Un élément troublant reste à ce jour inexpliqué : pourquoi très peu de cas de MFM ont été diagnostiqués chez les enfants (qui sont pourtant les plus exposés à l'Aluminium vaccinal) ?

Face à ces incertitudes, on ne peut qu'encourager la poursuite des recherches sur la MFM, et notamment sur le mécanisme de migration de l'Aluminium vers les différents tissus et le cerveau.

## **2. Alternatives envisageables à l'utilisation de l'Aluminium**

Nous vivons à l'âge de l'Aluminium et il est fort probable que son utilisation va augmenter à l'avenir. Ce qui va accroître notre exposition et impacter la santé humaine. Bien que notre exposition quotidienne à l'Aluminium Peut ne pas être la cause d'un certain nombre de maladies humaines chroniques, mais elle peut certainement être un contributeur à de telles maladies. De ce fait l'un des principaux défis des chercheurs d'aujourd'hui est de remplacer les produits néfastes pour l'environnement et/ou dangereux pour l'homme par des produits moins toxiques, tel est le cas pour l'Aluminium (Exley *et al.*, 2017).

### **2.1. Cas des sels d'Aluminium dans le traitement de l'eau**

Le traitement de l'eau reste un défi et une source de problèmes, tels que les coagulants chimiques dangereux pour la santé et le carbone organique dissous, qui nécessitent une solution dans de nombreuses communautés. La qualité de l'eau est obligatoire pour atteindre les normes

de consommation. Les coagulants inorganiques / synthétiques les plus fréquemment utilisés dans les processus de coagulation / floculation à travers le monde sont le polychlorure d'Aluminium et le sulfate d'Aluminium. Une concentration résiduelle élevée peut encore subsister à la fin du traitement, qui est une préoccupation assez importante pour les autorités de santé publique. Ce qui mène à une augmentation de la demande de coagulants alternatifs d'origine naturelle, efficaces, rentables, facilement disponibles et non toxiques (De Souza Fermino *et al.*, 2017).

### 2.1.1. Coagulants Végétaux

L'utilisation de matériaux d'origine naturelle pour la clarification des eaux de surface avec un concept de turbidité élevée n'est pas nouvelle. Des extraits naturels dérivés de graines, de feuilles, d'écorces d'arbres et de racines de : Maïs, cèdre de la baie, haricot vert, manioc, tamarin...etc. Se sont avérés former des caillots ou des flocs lorsqu'ils sont utilisés dans le processus de clarification du traitement des eaux usées. De plus, ils ont des avantages avérés par rapport aux traditionnels, comme être peu coûteux, avoir un pouvoir antimicrobien et la capacité de travailler à de faibles concentrations, mais aussi et plus important encore, ils sont sûrs pour la santé humaine (Lopez-Léon *et al.*, 2017).

Parmi ces coagulants végétaux on peut citer le tanfloc, les graines de Moringa Oleifera, le jus de cactus, les feuilles de Gland et les alginates.

#### A. Tanfloc

Le Tanfloc est un coagulant organique naturel à base d'extrait de tanin. Ce produit est issu du métabolisme de certaines plantes, dont l'acacia mearnsii ou acacia noir (figure 05). Selon certaines études, le Tanfloc présente des performances d'abattement de la matière organique dissoute comparables à celles des sels d'Aluminium dans le traitement des eaux de surface, avec l'avantage de ne pas être influencé par le pH. Il peut être également utilisé dans le traitement des eaux usées, pour l'abattement de la demande chimique en oxygène (DCO), des matières en suspension (MES) et de la demande biologique en oxygène (DBO). Le Tanfloc est présenté comme le coagulant organique alternatif aux coagulants inorganiques (Aouba, 2017).



**Figure 05** : Plante d'acacia noir dont le Tanfloc est extrait (Motooka *et al*, 2003).

### **B. Graines de Moringa Oleifera**

Moringa Oleifera (MO) est une plante dont les graines contiennent une protéine qui peut être utilisée comme coagulant organique naturel pour traiter l'eau de surface et les eaux usées (Figure 06). Par rapport aux coagulants inorganiques conventionnels, le MO présente plusieurs avantages, elle est à moindre coût, non corrosive, non toxique pour l'environnement, biodégradable...etc. Des études antérieures ont montré que les extraits de MO sont très efficaces comme coagulant naturel pour réduire la couleur, la turbidité et les micro-organismes de l'eau brute (De Souza Fermino *et al.*, 2017).



**Figure 06**: Plante de Moringa Oleifera (Obsedian, 2017).

### **C. Jus de cactus**

Etant une innovation dans le domaine du traitement de l'eau, le jus de cactus connu aussi comme le figuier de barbarie (figure 06) représente une découverte révolutionnaire comme alternative aux substances Aluminiq ue utilisées pendant les processus de coagulation floculation. Montrant une efficacité élevée pour éliminer les impuretés de l'eau essentiellement ceux des flux

industriels de 100 NTU à 2 NTU, les coagulants extraits du jus de cactus présentent plusieurs autres avantages : peut éviter des modifications relatives aux propriétés physico-chimiques de l'échantillon traité, la boue récupérée sera biodégradable et exempte de fer ou d'Aluminium et de polymères chimiques. Ce procédé sera rentable et s'introduira dans le développement durable dans les régions où les cactus sont cultivés à grande échelle (Abid *et al.*, 2009).



**Figure 07** : Figuier de Barbarie (Abid *et al.*, 2009)

### D. Feuilles de chêne

L'utilisation de feuilles de chêne comme coagulant naturel pour réduire la turbidité de l'eau brute et l'amélioration de la qualité de l'eau potable à l'échelle mondiale a été étudiée par A. Benalia et al en 2018 ils ont démontré l'efficacité des feuilles de chêne pour éliminer la turbidité de l'eau. L'échantillon d'eau étudié était une eau brute qui a été collectée à partir d'une station de traitement d'eau potable située à Mila (Algérie). Ce bio-coagulant a montré une efficacité d'élimination de la turbidité de l'ordre de 71,6% pour les feuilles de chêne en poudre, et de 88,77% pour la solution obtenue par distillation des feuilles de chêne (Benalia *et al.*, 2018).



**Figure 08** : feuilles de chêne (Bernard, 2018).

### E. Alginate de calcium

L'Alginate, est un polysaccharide obtenu à partir d'algues marines brunes (figure 07). Lorsqu'il est mélangé avec des ions de calcium il produit une structure de gel appelé alginate de calcium, ce dernier représente un coagulant organique qui peut être utilisé lors du processus de traitement de l'eau. Une étude menée par Çoruh en 2005 sur des échantillons d'eau brute récupérée dans une station de traitement de la ville d'Ankara en Turquie a démontré l'efficacité de l'alginate de calcium à éliminer la turbidité de l'eau. Çoruh a obtenu des résultats décisifs de 98% concernant l'efficacité de ce composant à éliminer différents taux de turbidité de l'eau variant entre 150 NTU et 80 NTU pour chaque échantillon d'eau étudié (Çoruh, 2005).



**Figure 09:** Algue marine brune dont l'alginate est extrait (Paysant, 2017).

### 2.1.2. Autres coagulants

#### A. Polymères à base microbienne

Autres que les coagulants d'origine végétale, il existe des coagulants produits par des bactéries et des champignons. Les micro-organismes peuvent produire des coagulants flocculant différents de leur souche bactérienne, exemple des coagulants protéoglycanes (98 % de polysaccharide et 1,6 % de protéine), sont obtenus à partir de la souche de *Bacillus mojavensis* avec une activité flocculante intéressante de 96 % enregistrée à pH10. Mais divers autres facteurs doivent être pris en compte dans la sélection des bactéries. Les nutriments essentiels à la croissance microbienne sont principalement des éléments de carbone et d'azote, dont les eaux usées et les boues en sont abondantes. Un milieu de croissance optimale peut favoriser la croissance des micro-organismes qui sert de base pour ces coagulants (Ang *et al*, .2020).

### **B. Polymères d'origine animale**

Le coagulant d'origine animale appelé le chitosane est principalement dérivé de la chitine, qui est l'élément le plus courant dans la nature après la cellulose. Etant recyclable et aussi un bon agent chélatant (pour le cadmium, le chrome, les ions plomb et Aluminium), le chitosane est un excellent choix pour le traitement des eaux usées industrielles. Cependant, le chitosane est insoluble dans l'eau ou dans le solvant. Ainsi des acides dilués tels que l'acétique et l'acide chlorhydrique sont utilisés pour le solubiliser (Ang *et al.*, 2020).

### **C. Amidon**

L'amidon est un produit naturel présent dans la partie comestible de nombreux végétaux (maïs, riz, tapioca, pommes de terre...etc.). L'amidon n'est pas soluble dans l'eau, toutefois il est possible d'augmenter sa solubilité en substituant des groupements hydroxyles (OH) contenus dans sa structure par des groupements phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) pour le rendre ionique. Suivie d'un séchage et d'un traitement thermique à fin d'obtenir un polymère anionique soluble dans l'eau. Selon l'étude menée par Delly en 2017, les biopolymères à base d'amidon présentent une efficacité à éliminer les polluants de l'eau et hydrater les boues résultantes du processus de traitement de l'eau. Ainsi ils peuvent être utilisés comme alternative organique pour les coagulants conventionnels à base d'Aluminium (Delly, 2017).

## **2.2 Autres alternatives à l'Aluminium**

### **A. Pour les emballages**

Le papier Aluminium est un constituant de base dans la cuisine, utilisé pour la cuisson ou pour la conservation d'aliments il représente une source de contamination. Connue aussi sous le nom de Bee Wrap, la cire d'abeille est d'origine végétale et naturellement antibactérienne donc protège les aliments de l'oxydation, tout en les conservant plus longtemps. On peut l'utiliser au contact direct des aliments sans se soucier de ses effets toxiques ou bien un quelconque danger sur la santé du consommateur (Martin-Krumm, 2020).

### **B. Pour les Produits cosmétiques**

Les cosmétiques biologiques font partie d'une famille de produits composés d'un très grand pourcentage d'ingrédients naturels, qui sont issus du règne végétal. Ce pourcentage peut varier puisqu'il n'existe pas de réglementation spécifique. La cosmétique BIO se rapproche de la cosmétique naturelle, elle consiste en une cosmétique naturelle, elle consiste en une

cosmétique naturelle avec une partie de ses ingrédients sont issus de l'agriculture biologique (Monteiro, 2015).

### **3. Elimination de l'Aluminium du corps humain**

D'après le Dr Exley et à la lumière de ce qu'ils ont trouvés lui et son équipe de recherche lors des essais cliniques, impliquant à la fois des individus en bonne santé et des personnes atteintes de maladies, que boire environ un litre d'eau minérale riche en silicium (avec une concentration minimale de 30 mg de silicium/ l d'eau) chaque jour peut accélérer l'élimination de l'Aluminium toxique du corps via les reins. Leurs études ont montré que les individus ont subi des réductions significatives de leur charge corporelle en Aluminium de l'ordre de 70 % sur une période de 12 semaines. Le silicium suit les molécules d'eau à travers la paroi intestinale et dans la circulation sanguine où il forme un complexe avec l'Aluminium appelé hydroxy Aluminosilicate facilement filtrée du sang par le rein. Par conséquent, les eaux minérales riches en silicium augmentent l'excrétion d'Aluminium dans l'urine (Exley, 2017).

# **Conclusion**

### Conclusion et perspectives

L'Aluminium occupe une place importante dans notre quotidien. Il est utilisé dans le traitement de l'eau pour l'élimination de sa turbidité et afin d'améliorer sa qualité organoleptique, ce qui a poussé de nombreux chercheurs à étudier son potentiel pouvoir toxique.

Il existe des valeurs réglementaires limitant sa teneur dans l'eau, cette réglementation permet de diminuer l'exposition de l'Homme. Actuellement, la teneur maximale admissible pour l'Aluminium dans les eaux de consommation est de 0,2 mg/l, excepté pour les eaux minérales où aucune limite n'est définie. Par ailleurs, d'après notre recherche bibliographique, plusieurs chercheurs ont formulé des recommandations de revoir ladite norme à 0,1 mg/l.

Même si la plupart des eaux distribuées à la population respectent la valeur limite fixée par l'OMS et qu'il est peu absorbé au niveau digestif, l'Aluminium reste un élément nocif pour la santé humaine, il serait plus judicieux de réduire sa teneur dans les eaux, en remplaçant les sels d'Aluminium utilisés comme agents coagulant par d'autres coagulants moins nocifs tel que les coagulants végétaux (les Tanfloc, le Moringa Oleifera, les feuilles de Gland...).

Comme il est aussi nécessaire de tenir compte des nombreuses autres sources d'Aluminium auxquelles nous sommes exposés quotidiennement. En effet, il est naturellement présent dans les aliments comme (thé, noix, produits laitiers, etc.), mais aussi dans les additifs alimentaires. On le retrouve aussi dans les ustensiles de cuisine, les emballages, les vaccins, les produits cosmétiques et même dans les médicaments.

L'exposition à l'Aluminium provoque des effets indésirables d'ordre neurologique (encéphalopathie, maladie d'Alzheimer), hématologique et osseux quelle que soit la voie de contamination. Il est néanmoins très difficile d'évaluer l'impact réel de l'Aluminium sur les pathologies que nous venons d'évoquer.

Au final, même si les mécanismes de toxicité de l'Aluminium sont encore loin d'être totalement expliqués, on ne peut pas nier son rôle potentiel dans la survenue de certaines pathologies. La communauté scientifique, les gouvernements et l'industrie mondiale, doivent reconnaître sa toxicité potentielle sur la santé publique. Le mystère reste entier, la poursuite des études et recherches scientifiques est une nécessité.

## Références bibliographiques

**Abid *et al.*, 2009.** Utilisation d'un nouveau bio-floculant extrait du cactus marocain dans le traitement des rejets chargés de chrome (VI) par le procédé de coagulation floculation, publié sans Afrique Science,

**Achour *et al.*, 2016.** Mémoire de Master, Optimisation des tests de coagulation floculation des eaux du barrage de TAKSEBT, Université de Tizi-Ouzou (Algérie), 106p.

**AFSSA, 2005.** (Agence française de sécurité alimentaire), Fiche 8, Evaluation des risques sanitaires liés au dépassement de la référence de qualité de l'aluminium dans les eaux destinées à la consommation humaine, janvier.

**AFSSAPS, 2011.** (Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé), Évaluation du risque lié à l'utilisation de l'aluminium dans les produits cosmétiques.

**AMESSI, 2008.** (Alternatives médecines évolutives santé et sciences innovantes), Eau, Aluminium et Alzheimer.

**Ang *et al.*, 2020.** Insight on extraction and characterisation of biopolymers as the green coagulants for microalgae harvesting, publié dans la revue Water, 12-138 P.

**Aouba. N ,2017.** Mémoire, Étude d'un coagulant organique naturel pour le traitement des eaux potable et usées : le tanfloc, Université Laval Québec (Canada), 142p.

**ATSDR, 2008.** (Agency for toxic substances and disease registry), Toxicological profile for Aluminium.

**Babin. J, 2016.** Thèse de Doctorat, Les adjuvants vaccinaux : Étude de la balance bénéfice / risque, Université de Poitiers (France), 114p.

**Batisse. E, 2014.** Thèse de Docteur en Pharmacie, L'aluminium, un produit dangereux pour la santé présente en thérapeutique et en cosmétique : mythe ou réalité ? Faculté de Pharmacie, Université de lorraine(France), 116p.

**Bégué. P *et al.*,2012.** Les adjuvants vaccinaux : quelle actualité en 2012, Académie national de médecine.

**Benalia *et al.*, 2018.** Use of acorn leaves as a natural coagulant in a drinking water treatment plant, publié dans la revue Water. 11- 57P.

**Bernard. C, 2018.** Le chêne (*Quercus SPP*), consulté en ligne sur [https://www.altheaprovence.com/le-chene-quercus-spp-diarrhees-angines-hemorroides/?fbclid=IwAR265jr6CMbX\\_d1dnhh97G19hng9gThAMN3v26CZmusuMhi2fN7ZepHYJKo](https://www.altheaprovence.com/le-chene-quercus-spp-diarrhees-angines-hemorroides/?fbclid=IwAR265jr6CMbX_d1dnhh97G19hng9gThAMN3v26CZmusuMhi2fN7ZepHYJKo)

**Berthomier. M, 2019.** Thèse de doctorat, Etude de la lixiviation de l'aluminium de matériaux cimentaires à base de CEM III utilisés dans les canalisations d'eau potable : approche expérimentale et numérique, Université de Toulouse (France), 339P.

**Bisson *et al.*, 1992.** La consommation de l'eau potable et la santé : Evaluation critique de l'état de la question selon la littérature épidémiologique, institut national de santé publique du Québec(Canada), 156P.

**Bourbas *et al.*, 2016.** Mémoire de Master, Suivie de l'évolution de la concentration de l'aluminium par la méthode LCK 301 des eaux du barrage de Taksebt, Université de Tizi-Ouzou (Algérie), 103P.

**Cherifi. M, 2013.** Thèse de Doctorat, Décontamination électrocinétique d'une boue d'eau potable contenant de l'aluminium, Université de Annaba(Algérie).

**Çoruh. H. A, 2005.** Thèse, Use of calcium alginate as a coagulant in water treatment.

**Cunat. L, 1999.** Thèse de Doctorat, Biodisponibilité de l'aluminium dans l'intestin, Etudes in vitro et in vivo chez le rat, Université de Metz(France), 379P.

**De Souza Fermino *et al.*, VOL. 57.2017.** Water treatment with conventional and alternative coagulants, publié dans Chemical engineering transaction.

**Delly. L, 2017.** Mémoire, Impact de l'utilisation d'un polymère biosourcé sur la réduction du colmatage en filtration granulaire, Université de Montréal (Canada).

**Dietrich. F, 2017.** Thèse de doctorat, Doit-on douter de la sécurité des vaccins ? Exemple de l'Aluminium, Université de Picardie Jules Verne, Amiens (France), 99P.

**E.A.A, 2015.** (European Aluminium association), Fiche 4,7 et 8 l'ALUMINIUM ET LA SANTE.

**Ecoverre, 2018.** L'Aluminium: Les impacts environnementaux et alternatifs de consommation, consulté en ligne Sur <https://www.ecoverre.com/laluminium-les-impacts-environnementaux-et-alternatives-de-consommation-n-41-fr>.

**EFSA, 2008.** (European food safety agency), Sécurité de l'Aluminium provenant de l'apport alimentaire, Avis scientifique du groupe scientifique sur les additifs alimentaires, les arômes, les auxiliaires technologiques et les matériaux en contact avec les aliments (AFC), publié dans le journal de l'EFSA.

**Esquerre. N, 2016.** Thèse de doctorat, L'aluminium, facteur de risque environnemental impliqué dans la physiopathologie des maladies intestinales, Université de Lille France, 248P.

**Exley. C et Esiri. MM, 2006.** Angiopathie congophile cérébrale sévère coïncidant avec une augmentation de l'aluminium cérébral chez un résident de Camelford, Cornwall, UKJournal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry.

**Exley. C, 2017.** Pourquoi tout le monde devrait boire de l'eau minérale riche en silicium, article publié en Mars.

**Exley. C, 2017.** Aluminum Should Now Be Considered a Primary Etiological Factor in Alzheimer's disease, Journal of Alzheimer's Disease Reports.

**Exley. C, et al, 2006.** « Elevated urinary excretion of aluminium and iron in multiple sclerosis », revue de la Sclérose en plaques.

**Exley. C, 2013.** Human exposure to aluminium, Le Birchall Centre, Laboratoires Lennard-Jones, Université de Keele, Staffordshire (Royaume-Uni).

**Exley. C, 2017.** L'ère de l'aluminium, article publié dans un Blog Médical « The Hippocratic Post ».

**Gabignon. M 2020.** Thèse de Doctorat, Sels d'aluminium dans les antitranspirants et risque potentiel du cancer du sein : connaissances actuelles et rôle du pharmacien d'officine, Université de Poitiers (France), 147P.

**Hasni. I, 2015.** Thèse, Investigation des mécanismes de toxicité de l'Aluminium sur les propriétés fonctionnelles et structurales de l'appareil photosynthétique, Université du Québec. Canada, 221P.

**Haut conseil de la sante publique,** Aluminium et vaccins, rapport 2013.

**INRS, 2014.** (Institut national de la recherche scientifique), Aluminium et ses composés minéraux, Fiche toxicologique n°306.

**INSPQ, 2010.** (Institut national de santé publique du Québec), Détermination de concentrations seuils de trihalométhanes dans l'eau potable lors de dépassements trimestriels de la norme, 123P.

**INVS, 2003.** (Institut de veille sanitaire), Aluminium : quel risque pour la santé ? - Synthèse des études épidémiologiques, 184P.

**INVS, 2003.** (Institut de veille sanitaire), Evaluation des risques sanitaires liés à l'exposition de la population française à l'aluminium : eaux, aliments, produits de santé. INVS, AFSSA, AFSSAPS, 192P.

**Jones. K, Linhart. C, Hawkins. C, Exley. C, 2017.** Urinary excretion of aluminium and Silicon in secondary progressive multiple sclerosis, Article publié Dans EBioMedicine, Octobre.

**Journal officiel de. La république Algérienne N° 13,** annexe Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine, Tableau 1 : paramètres avec valeurs limites, correspondant au 9 mars 2014 relatifs à la qualité de l'eau de consommation humaine.

**Julien. M, 2011.** Diplôme d'ingénieur du Génie Sanitaire, Evaluation de l'impact sanitaire d'une eau de boisson non-conforme pour la population du Languedoc Roussillon Mise en évidence des priorités d'intervention, Ecole des hautes études en santé publique, 98P.

**Karbouj. R, 2008.** Thèse de Doctorat, Transfert d'aluminium : cas des matériaux pour contact alimentaire, Institut Polytechnique de Grenoble(France), 293P.

**Klein J. P, Mold. M, Mery. L, Cottier. M, Exley. C, 2014.** « Aluminum content of human semen: Implications for semen quality », revue Reproductive Toxicology.

**Klein. J. P, 2015.** Thèse de Doctorat, Evaluation de l'impact des Nanoparticules et de l'Aluminium sur la fonction de reproduction masculine, Université Jean Monnet – Saint-Etienne (France).

**LECMA-Vaincre Alzheimer, 2005.** Comprendre la maladie D'Alzheimer, association d'intérêt général, à but non lucratif.

**Lopez-Léon et al., 2017 ;2(12):687-694.** Vegetable coagulants as alternative for treatment of wastewater in Mexico, publié dans Journal of negative & no positive results,

**Martin-Krumm. J, 2020.** Par quoi remplacer le papier aluminium ? Alternatives écolos, article consulté en ligne SUR <https://hiloo-environnement.com/blogs/infos/remplacer-papier-aluminium-alternatives>

**Medjdoul *et al.*, 2018.** Mémoire de Master, Abattement des concentrations en sels d'alumine dans les eaux traitées de la station SEAAL du barrage de Taksebt par des procédés d'adsorption, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Algérie), 63P.

**Merlo. C, 2014.** Thèse de Docteur en Pharmacie, utilisation des adjuvants dans les vaccins : état des lieux et actualités, Université de Toulouse III– Paul Sabatier(France), 117P.

**Metahri *et al.*, 2017.** Monitoring control of Aluminium salt concentrations in the process of drinking water treatment, communication orale in the international conference of agriculture and food Bulgaria,.

**Monteiro. S, 2015.** Thèse de Doctorat, les perturbateurs endocriniens : des ingrédients contestés dans les produits cosmétiques, Université Toulouse III Paul Sabatier (France).

**Motooka *et al.*, 2003.** Weeds of hawai'i's pastures and natural areas, guide d'identification et de gestion, Collège d'agriculture tropicale et de ressources humaines, Université d'Hawaï à Mānoa.

**Obsidian. S, 2017.** Kalamunggay (*Moringa oleifera*) Philippines, consulté en ligne le sur [https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Kalamunggay\\_\(Moringa\\_oleifera\),\\_Philippines.jpg?fbclid=IwAR0bT5SJT9Zihhc-Z8YUTEZJu6yuoIa5syZuGGbNgw210C5-z8WN\\_5SmVi4](https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Kalamunggay_(Moringa_oleifera),_Philippines.jpg?fbclid=IwAR0bT5SJT9Zihhc-Z8YUTEZJu6yuoIa5syZuGGbNgw210C5-z8WN_5SmVi4)

**Paysant. J, 2017.** Lutter contre l'arthrite grâce aux algues brunes, consulté en ligne sur <https://www.sante-sur-le-net.com/lutte-arthrite-algues-brunes/amp/?fbclid=IwAR2LeP-m5imRROw6H0eKvLfxkAsA8wSgxq8zCV6GtQR28UNTSnNvdIetdDM>

**Pilette. J, 2008.** Aluminium et Vaccins, european forum for vaccine vigilance.

**Rigolet. M, *et al.*, 2014.** Caractéristiques cliniques des patients atteints d'une myofasciite à macrophages persistante, Article publié Dans *Frontiers in Neurology*.

**Santé Canada, 2019.** Document technique pour consultation publique, L'aluminium dans l'eau potable(Canada).

**Secrétariat du grand conseil, 2018.** Proposition de résolution pour une interdiction des sels d'aluminium et de ses dérivés dans les produits cosmétiques (résolution du grand conseil genevois à l'assemblée fédérale exerçant le droit d'initiative cantonale),.

**Sonthonnax. J, 2014.** Thèse de Docteur d'état en Pharmacie, L'aluminium et son potentiel toxique, Université de Limoges (France), 142P.

## Résumé

L'Aluminium est un élément omniprésent dans notre quotidien. Partout l'homme en boit, mange et respire. Si l'Aluminium a envahi nos vies, c'est qu'il a longtemps été considéré comme sans risque pour notre santé. Dans l'eau, l'élément le plus consommé, l'Aluminium peut s'y trouver naturellement, du fait de son utilisation dans les procédés de potabilisations, où les sels d'Aluminium sont utilisés comme agent coagulant pour l'abattement de la matière organique et l'élimination de la turbidité. L'organisation mondiale de la santé (OMS) recommande une concentration maximale en Aluminium de 0.2 mg/l dans l'eau potable, la fixation de cette norme est basée sur l'optimisation de l'utilisation des sels d'Aluminium pour des raisons économiques sans aucune étude fondée par rapport aux risques sanitaires. Ce n'est que récemment qu'on a fait le point sur son écotoxicité, certaines études ont montré qu'il joue un rôle important dans la propagation de certaines maladies en particulier celles du système nerveux central dont la maladie d'Alzheimer. D'autres études suggèrent que l'Aluminium est responsable de l'augmentation des cas de la sclérose en plaque, de l'encéphalopathie, il est également suspecté d'être un facteur de baisse de fertilité masculine. L'objectif de ce travail est de montrer que les sources d'exposition à ce métal sont diverses et multiples, entre autres l'eau potable, d'essayer de trouver des alternatives à son utilisation, tel que son remplacement par des coagulants végétaux (*Moringa oleifera*, tanfloc, les feuilles de gland...) dans les traitements de potabilisation des eaux ; et de faire le point grâce à certaines études publiées récemment sur les recommandations relatives à sa teneur dans l'eau potable. Afin de comprendre quels sont réellement les effets toxiques qu'on peut lui attribuer et tirer des conclusions sur ce sujet qui n'a pas fini de faire débat.

**Mots-clés :** Aluminium, eau potable, effets toxiques, alternatives, normes recommandés.

## Abstract

Aluminium is an omnipresent element in our daily lives. Everywhere people drink, eat and breathe it. Aluminium has invaded our lives because for a long time it was considered for so long as safe for our health. In water, the most consumed element, Aluminium can be found naturally, due to its use in drinking water treatment processes, where Aluminium salts are used as coagulation agents to reduce organic matter and eliminate turbidity. The World Health Organisation (WHO) recommends a maximum concentration of 0.2 mg/l of Aluminium in drinking water. The setting of this standard is based on the optimisation of the use of Aluminium salts for economic reasons without any well-founded studies in relation to health risks. It is only recently that its ecotoxicity has been reviewed. Some studies have shown that it plays an important role in the spread of certain diseases, particularly those of the central nervous system, including Alzheimer's disease. Other studies suggest that Aluminium is responsible for the increase in cases of multiple sclerosis, encephalopathy, it is also suspected of being a factor in the decrease in male fertility. The aim of this work is to show that the sources of exposure to this metal are diverse and multiple, including drinking water ; to try to find alternatives to its use, such as its replacement by plant coagulants (*Moringa oleifera*, tanfloc, acorn leaves, etc.) in water purification treatments ; and to take stock of some recently published studies on the guidelines for its content in drinking water. In order to understand what are the real toxic effects that can be attributed to it and to draw conclusions on this subject which is still under debate.

**Keywords:** Aluminium, drinking water, toxic effects, alternatives, recommended standard

## ملخص

الألومنيوم عنصر موجود في كل مكان في حياتنا اليومية. الناس يشربونه ويأكلونه ويتنفسونه. إذا غزا الألومنيوم حياتنا، فذلك لأنه لطالما اعتبر آمناً لصحتنا. في الماء، العنصر الأكثر استهلاكاً، يمكن العثور على الألومنيوم هناك بشكل طبيعي، نظراً لاستخدامه في عمليات مياه الشرب، حيث يتم استخدام أملاح الألومنيوم كعامل تخثر لتقليل المادة العضوية والقضاء على العكارة. توصي منظمة الصحة العالمية (WHO) بحد أقصى لتركيز الألومنيوم يبلغ 0.2 مجم / لتر في مياه الشرب، ويستند تحديد هذا المعيار إلى تحسين استخدام أملاح الألومنيوم لأسباب اقتصادية دون أي دراسة قائمة على أسس متينة فيما يتعلق بالمخاطر الصحية. لم نعلم إلا مؤخراً بتقييم سميته البيئية، وأظهرت بعض الدراسات أنه يلعب دوراً مهماً في انتشار أمراض معينة، لا سيما أمراض الجهاز العصبي المركزي، بما في ذلك مرض الزهايمر. تشير دراسات أخرى إلى أن الألومنيوم مسؤول عن زيادة حالات التصلب المتعدد واعتلال الدماغ، كما يُشتبه في أنه عامل في انخفاض خصوبة الرجال. الهدف من هذا العمل هو إظهار أن مصادر التعرض لهذا المعدن متنوعة ومتعددة، بما في ذلك مياه الشرب، لمحاولة إيجاد بدائل لاستخدامه، مثل استبداله بمخترات نباتية (مستخرج العفص، أوراق المورينجا، أوراق البلوط، إلخ) في علاج المياه؛ ولتقييم بعض الدراسات المنشورة حديثاً حول التوصيات لمحتواها في مياه الشرب. من أجل فهم ماهية التأثيرات السامة حقاً التي يمكن أن تُنسب إليها واستخلاص استنتاجات حول هذا الموضوع لم تنته بعد للمناقشة.

**الكلمات المفتاحية:** الألومنيوم، مياه الشرب، التأثيرات السامة، البدائل، المواصفات الموصى بها.