



710THV-2

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Université SAAD DAHLAB BLIDA



Faculté des sciences Agrovétérinaire et de biologie
Département des sciences vétérinaires

Mémoire Présenté Pour L'obtention Du Diplôme De Docteur En Médecine
Vétérinaire

⌘ **Thème** ⌘

*Contribution à l'évaluation des métaux lourds dans les
denrées alimentaires d'origine animale*

(Exemple la volaille)

Préparé par :

ZAOUADI MOHAMED CHERIF

Promotrice : *AMRARA MADI* Maître Assistante B Université SAAD DAHLAB BLIDA

Membres Jury:

Président de jury: BELABBAS Rafik Maître Assistant B Université SAAD DAHLAB BLIDA

Examineur : *KHALED Hamza* Maître Assistante B Université SAAD DAHLAB BLIDA

Année Universitaire 2012-2013

REMERCIEMENTS

Au terme d'un labeur assidu, je tiens à remercier, au préalable Dieu le tout puissant de m'avoir donné force et sérénité en vue d'accomplir ce modeste travail.

Je remercie très sincèrement Madame AMARA MADI Fatma et Monsieur KHALED Hamza de leurs soutiens et aides durant *toute la période du projet*.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus vifs à Monsieur BELABBAS Rafik , Maitre assistant à l'Université SAAD DAHLAB BLIDA', pour avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette soutenance.

Je tiens à remercier Monsieur KHALED Hamza, Maitre assistant à l'Université SAAD DAHLAB BLIDA, qui a bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Mes pensées les plus chères vont d'abord à Malika ma très chère mère dont la disponibilité d'affection et d'amour à tout instant,

A mon adorable papa Sid Ahmed, jamais avare de soutien et de conseil dans les moments les plus critiques,

Sans oublier mes sœurs Nesrine et Manel dont la sollicitude à bien des égards m'ont aidé à surmonter plein de difficultés,

Je voudrais sincèrement exprimer mes plus vifs remerciements et ma gratitude à tous mes enseignants que j'ai eus au cours de mon cursus universitaire, ils m'ont donné le goût et le plaisir de faire de la recherche. Je les remercie de m'avoir accueilli au sein de leur formation.

Enfin, je tiens à remercier tous mes amis qui ont partagé avec moi ces semaines de rédaction, sautes d'humeurs et l'angoisse de mal faire.

Résumé

La contamination de l'environnement par de nombreux produits chimiques potentiellement toxiques, est devenue une évidence et une source d'inquiétude. De façon directe ou indirecte, des substances à caractère toxique notamment les métaux lourds sont introduites dans l'alimentation : s'agissent de substances stables chimiquement, pour la plupart, leur élimination s'avère problématique et leur rémanence importante.

Des approches de surveillance peuvent être utilisées afin de mesurer et contrôler l'exposition des populations (humaines ou animales) à des contaminants industriels ou environnementaux. Lorsqu'il s'agit de mesurer l'impact global de l'environnement chez des populations exposées à une pollution chimique, exemple les abats de volaille (foie, rien, sang) par exemple sont d'excellents indicateurs à l'exposition de substances comme les métaux polluants (plomb, mercure, cadmium) car ils présentent la propriété de bioconcentrer certains métaux.

Mots clés : pollution, métaux lourds, aliments, volaille.

Abstract

Contamination of the environment by many potentially toxic chemicals is considered a serious problem. Heavy metals substances toxic are introduced into the food chain: to act chemically stable substances, for most, their elimination is problematic.

Monitoring approaches can be used to measure and control the exposure of populations (human or animal) to industrial or environmental contaminants. When it comes to measuring the overall impact of the environment in populations exposed to chemical pollution, offal (liver, anything, blood) animals such as poultry are excellent indicators of exposure substances such as pollutants metals (lead, mercury, cadmium) because they have the property of bioaccumulation.

Key words : pollution, Heavy metals, food, poultry.

المخلص

يعتبر التلوث بالمعادن الثقيلة مشكلة خطيرة بسبب سميتها وقد رنھا على التراكم في السلسلة الغذائية سواء بطريقة مباشرة او غير مباشرة. تعتبر معادن مستقر كيميائيا، و بالتالي القضاء عليها يمثل إشكالية هامة. لقياس ومراقبة التعرض إلى الملوثات الصناعية أو البيئية عند الكائن (الإنسان أو الحيوان). عندما يتعلق الأمر بقياس التأثير الإجمالي للبيئة والفئة المعرضين للتلوث الكيميائي، ما تبعه. فان الحيوانات مثل الدواجن هي مؤشرات ممتازة لتعرض إلى المواد مثل المعادن الملوثات (الرصاص، الزئبق، الكادميوم) لقدرتها على التركيز في الكبد. الكلي و الدم.

الكلمات المفتاحية: التلوث، المعادن الكيميائية، غذاء، الدواجن.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I GENERALITE SUR LES METAUX LOURDS	
I.1.DEFINITIONS	3
I.2. LE PLOMB	5
I.2.1.Histoire	5
I.2.2.Propriétés physico-chimiques du plomb.....	5
I.2.3.Toxicocinétique	6
a.Voies de pénétration.....	6
B.METABOLISME ET DISTRIBUTION	7
c.Elimination.....	7
I.2.4 Mécanisme d'action.....	8
I.2.5.Toxicité.....	8
a. Toxicité aigue	8
b. Toxicité chronique	9
I.2.6. Effet sur la reproduction.....	10
I.2.7. Valeur toxique de référence.....	10
I.3. LE CADMIUM.....	10
I.3.1. Histoire	10
I.3.2. Propriétés physico-chimiques du cadmium	11
I.3.3. Toxicocinétique	11
I.3.4. Mecanisme d'action.....	12
I.3.5. Toxicité.....	12
a. Toxicité aigue.....	12
b. Toxicité chronique	13
I.3.6. Effet sur la reproduction et le développement.....	14
I.3.7. Valeur toxique de référence	14
I.4. LE MERCURE	15
I.4.1. Histoire	15
I.4.2. Propriétés physico-chimiques du mercure	15
I.4.3. Toxicocinétique	15
I.4.4. Mecanisme d'action.....	15
I.4.5. Toxicité aigue	16
a. Mercure organique	17
b. Mercure inorganique	17
I.4.6. Effet sur la reproduction et le développement.....	17
I.4.7. Valeur de référence	19
CHAPITRE II MODALITE D'EXPOSITION AUX METAUX LOURDS	
II.1. ORIGINE ET PRODUCTION DES METAUX LOURDS	19
II.2. USAGE DES METAUX LOURDS	19
II.2.1. Cadmium	19
II.2.2. Plomb.....	20
II.2.3. Mercure.....	20
II.3. DISTRIBUTION ET IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT.....	20
II.3.1 Contamination des sols	21
II.3.2. Contamination de l'air.....	21
III.3 Contamination de l'eau.....	22
II.4. CONTAMINATION DE LA CHAINE ALIMENTAIRE.....	23
II.4.1 Bioaccumulation	23
II.4.1.1. Les facteurs de variation de la bioaccumulation	24

a. Propriétés chimiques du contaminant	24
b. Facteurs biologiques de l'organisme	24
c. Caractéristiques physico-chimiques du milieu	24
II.4.1.2. Bioaccumulation en milieu terrestre.....	25
a. Végétaux.....	25
b. Animaux	25

CHAPITRE III LA METHODE D'ANALYSE DES METAUX LOURDS

III.1. METHODE D'ANALYSE	27
III.1.1. Traitement d'échantillon.....	27
III.1.1.1. Minéralisation par voie sèche	27
III.1.1.2. Minéralisation par voie humide	27
III.1.2. Méthode de mesure.....	27
III.1.2.1. Méthode par Spectrométrie Absorption Atomique (SAA)	28
III.1.2.2.1. DOMAINE D'APPLICATION	28
III.1.2.2.2. PRINCIPE	28
III.1.2.2.2. APPAREILLAGE EN ABSORPTION ATOMIQUE.....	29
III.1.3. Critère de validation d'une méthode d'analyse.....	33

CHAPITRE IV PART DE L'ALIMENTATION DANS L'EXPOSITION TOTALE

IV.1 PART DES ALIMENTS D'ORIGINES ANIMALES (EXMPLA LA VOLAILLE)	3 ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.1.1. Viande et exposition alimentaire	35
IV.1.2. Résultats des plans de surveillances des métaux lourds dans la volaille	36
IV.2 PART DE L'ALIMENTATION ANIMALE:	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	39
--	-----------

BIBLIOGRAPHIE.....	40
---------------------------	-----------

Liste des illustrations**Liste des tableaux**

Tableau 1 : Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité.....	3
Tableau 2 : Principale caractéristique physique du plomb.....	4
Tableau 3 : Principale caractéristique physique du cadmium.....	5
Tableau 4 : Principale caractéristique physique du mercure	8
Tableau 5 : Exposition et apports moyens journaliers de la population française en métaux lourds via les viandes et abats.....	36
Tableau 6 : La contamination globale du poulet par trois métaux et par localité ($\mu\text{g}/\text{kg}$).....	37

Liste des figures

Figure 1 : Table périodique des éléments.....	4
Figure 2 : Aspect du plomb.....	6
Figure 3 : Les voies d'absorptions et distributions d'un métal dans l'organisme humain.....	6
Figure 4 : Mécanisme d'action du plomb.....	8
Figure 5 : Aspect du cadmium	11
Figure 6 : Déformation osseuse (Maladie Itai-Itai)	13
Figure 7 : Cycle d'acquisition des teneurs en ETM dans les sols	15
Figure 8 : Source de pollution des chaînes alimentaires.....	21
Figure 9 : Montage d'un appareil SAA avec brûleur.....	23
Figure 10 : Lampe cathode creuse.....	29
Figure 11 : Nébuliseur brûleur	30
Figure 12 : four graphite	39

Introduction Générale

La pollution de notre environnement est devenue une préoccupation majeure à l'échelle mondiale. Pendant de longues années et dans bien des pays, une industrialisation et une urbanisation rapide mais mal contrôlées ont eu pour conséquence des rejets de déchets industriels et ordures ménagères dans l'environnement. Les guerres chimiques ont laissé de nombreux sites pollués.

A l'heure actuelle, les combustions industrielles ou domestiques (incinération des ordures ménagères ou de déchets industriels, etc.), la décomposition des engrais chimiques, des insecticides représentent autant de source de contamination.

Des substances aux propriétés méconnues ont ainsi été rejetées, par fois en très grande quantité, dans l'eau, l'air ou les sols. Certaines d'entre elles comme les métaux lourds ont malheureusement révélé leur potentiel toxique à l'occasion des épisodes historiques de pollution.

Ces métaux lourds présentent, même à faible dose, une toxicité à long terme pour l'homme. C'est le cas du cadmium, du mercure, du plomb et de l'arsenic, toxiques par accumulation pouvant se retrouver à l'état de trace dans l'alimentation, dont les effets délétères sont observés après un temps de latence de plusieurs mois, voire plusieurs années pour le cadmium.

De nombreuses études, réalisées dans le cadre des travaux d'étudiant ou d'enquêtes attestent de la pollution dans la région d'Alger. On parle surtout des zones de décharge pleine de substances toxiques tel le plomb et cadmium rejetés dans la mer ou à proximité des oueds provoquant une forte pollution (WHO, 2001).

En Algérie, l'apport protéique est surtout apporté par la consommation de poulet de chair ainsi que ces abats compte tenu de leur faible cout (MADR, 2011 (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural).

La surveillance des niveaux de contamination des métaux lourds, tels le cadmium et le plomb dans l'alimentation est nécessaire en raison de leur fonction essentiel ,en effet ces deniers par leur effet délétère peuvent s'accumuler particulièrement dans le foie, le rein et la chair, ayant pour effet de renforcer la toxicité des denrées consommées (Demirbas ,1999). Ces risques sont exacerbés par l'inadéquation ou l'absence d'infrastructure sanitaire, de réglementations et enfin par l'application des normes d'implantation des élevages et industries de fabrication ou préparation des aliments pour animaux.

L'objectif de ce mémoire de fin d'étude est de faire une étude bibliographique sur les contaminants chimiques (métaux lourds) de la chaîne trophique d'origine animale (par exemple viande de volaille) et par là définir leurs impacts sur la santé publique et animale. Pour ce faire, ce mémoire est organisé comme suit : Dans le premier chapitre, nous réalisons une synthèse des connaissances scientifiques de base des métaux retenus dans cette étude, plomb, cadmium et mercure. Le second chapitre se veut une étude bibliographique détaillée sur l'origine des métaux lourds, leurs distributions et impacts sur l'environnement. Le troisième chapitre concerne la technique d'analyse (SAA) , la plus couramment utilisée en Afrique pour le dosage des éléments traces métalliques . Le quatrième chapitre est de mettre en évidence la part d'exposition totale de l'alimentation – comme exemple la volaille- par ces trois toxiques.

Finalement, la conclusion résumera l'ensemble des travaux de ce mémoire et présentera les perspectives envisagées.

CHAPITRE I :
GENERALITE SUR LES METAUX
LOURDS

Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de **pollution** et de **toxicité** sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn) et le zinc (Zn) (Tableau°1).

Tableau 1 : Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité (Bliefert et Perraud, 2001).

Métaux	Plante	Animaux	Densité g/cm ³
Cd	T	T	8.65
Cr	?	E	7.20
Cu	ET	ET	8.92
Ni	T	E	8.90
Pb	T	T	11.34
Zn	ET	E	7.14
Mn	ET	E	7.20

T=Toxique ; E=Essentiel

Parmi ces métaux toxiques quelques uns présentent une forte attirance pour un élément minéral qui, par ailleurs, n'est pas un métal (car par exemple ne conduisant pas le courant électrique) : c'est le cas du soufre (S) qui sous forme élémentaire (S₈), de sulfure de dihydrogène (H-S-H) les sulfures ou de sulfures composés organiques à fonction thiol : R -S-R (cystéine, glutathion, protéines à fonction thiol. ..) vont former de « lourds complexes » d'où le nom de métaux lourds donnés à l'origine par les biologistes à trois métaux dont le mercure, le plomb et le cadmium qui, à l'état de cations précipitent les protéines soufrées (Picot, 2003).

Le mercure (Hg), le plomb (Pb) et le cadmium (Cd) présentent en commun ces trois propriétés: une grande affinité pour le soufre sous forme réduite (c'est à dire non oxydée), la bioaccumulation dans l'environnement (dans les plantes, les animaux et l'homme) et une forte toxicité pour les organismes vivants (Picot, 2003).

Tant au niveau de leur impact sur l'environnement que dans l'étude de tous leurs effets toxiques sur les êtres vivants, il devient absolument nécessaire maintenant de prendre en compte

l'étude des différentes espèces chimiques intervenant dans les processus indésirables dont sont responsables le plomb et le cadmium.

I.2. Le plomb

I.2.1. Histoire

Le plomb est un métal lourd largement utilisé dans les activités métallurgiques dès l'antiquité et redécouvert au moment de la révolution industrielle. Les intoxications massives aiguës et chroniques par le plomb ont été bien documentées en milieu professionnel. Mais le plomb est également un polluant environnemental, surtout dans les sols et l'atmosphère au voisinage de sites industriels (Peltier et al., 1994).

I.2.2. Propriétés physico-chimiques du plomb

Elément chimique de la famille des cristallogènes. Le plomb est un métal argenté bleuâtre très mou et malléable, il a une faible conductivité électrique. Ce métal est à peu près insoluble dans l'eau, mais soluble dans les acides. Lorsqu'il est fondu, il peut former de nombreux alliages avec d'autres métaux.

Le plomb natif est rare, et dû à son caractère chalcophile il est associé au grissement de sulfures ; on l'extrait de sa source minérale principale la galène (PbS) qui en contient 86.6% en poids, mais aussi des minerais associés aux Zn (la sphalérite) (Hurlbut et Klein, 1982).

Le plomb prend une forme inorganique lorsqu'il s'associe à certains composés pour former des sels de plomb. Quant au plomb organique, il se présente le plus souvent sous forme de plomb tétra méthyle $Pb(CH_3)_4$ et de plomb tétra éthyle $(Pb(CH_2CH_3)_4)$ (Salvarredy Aranguren, 2008).

Tableau 2 : Principales caractéristiques physiques du plomb (Miquel,2001)

symbole chimique	Masse atomique	Masse volumique	Température de fusion	Température d'ébullition
Pb	270	11.35g/cm ³	370°C	1740°C

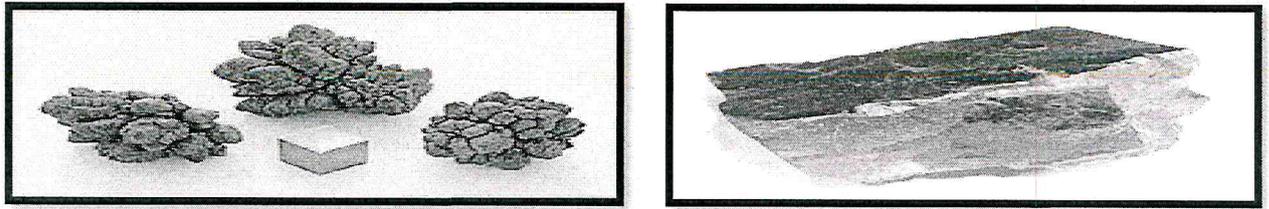


Figure 2 : Aspect du plomb (Anonyme, 2013)

I.2.3. Toxicocinétique

a) Voies de pénétration

Il existe deux voies majeures (figure 3°) d'entrée du plomb: le tractus digestif et le système respiratoire. Le plomb organique peut être également absorbé par la peau (Viala, 2007).

Les voies respiratoires absorbent très rapidement les vapeurs et les fines poussières. Il a été montré que chez l'homme, jusqu'à 37% du plomb inhalé était absorbé, tandis que le reste du toxique persiste de façon permanente dans les poumons (Viala, 2007).

L'absorption gastro-intestinale est cependant la voie la plus commune. Dans ce cas, seule une partie du plomb ingéré est effectivement absorbé (1 à 2 % au maximum), le reste est excrété dans les fèces (Viala, 2007).

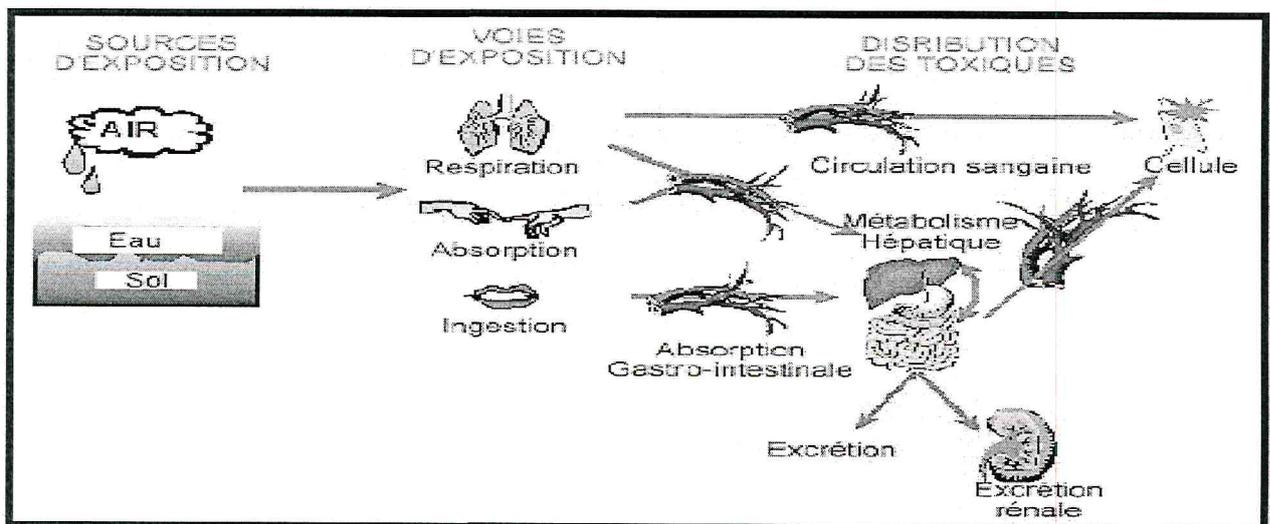


Figure 3 : Les voies d'absorptions et distributions d'un métal dans l'organisme humain (Afsset, 2006).

L'efficacité de l'absorption est influencée par l'état physico-chimique du toxique, les niveaux corporels d'autres éléments ainsi que par les caractéristiques de l'individu et son régime alimentaire (Pokras et Kneeland; 2008).

D'après Pokras et Kneeland (2008), quelque soit l'espèce l'homme, le condor ou le poisson, l'organisme gère le plomb de manière très similaire au calcium.

D'une manière générale, les jeunes animaux absorbent le plomb beaucoup plus efficacement que les adultes (NCR, 2005). Par exemple chez un homme l'ingestion infantile (50%) est plus élevée que celle de l'adulte (10%) (INSRM, 1999).

En effet il est souvent décrit que l'absorption du plomb est favorisée par une alimentation riche en matières grasses ou lors de certaines carence, notamment en fer ou en calcium.

b) Métabolisme et distribution

Quelle que soit la voie d'introduction, une fois dans l'organisme; le plomb n'est pas distribué de manière homogène, le modèle de Rabiowitz (1976), propose une répartition du plomb en trois compartiments.

Le plomb se trouve donc dans le sang, où il est intégralement réparti entre le plasma et les hématies, ces dernières sont les plus riches en métal (90% environ). C'est la raison pour laquelle, sur le plan analytique, le plomb doit être dosé à partir du sang total et non pas du sérum. Sa demi-vie dans le sang est de l'ordre de 25 à 35 jours (Viala, 2007).

Le plomb est ensuite distribué vers les autres compartiments corporels. Tout d'abord il va se fixer dans les tissus mous (notamment le foie, les reins, la moelle épinière, les surrénales et le système nerveux). Sa demi-vie dans les organes est alors de 40 à 60 jours (Viala, 2007).

Enfin le compartiment osseux, qui s'équilibre beaucoup plus lentement, peut stocker jusqu'à 99% de la charge corporelle totale. Sa demi-vie varie de 3 à 20 ans, son stockage dans l'os augmente avec l'âge (Viala, 2007).

c) Elimination

Il existe une grande variabilité dans les voies d'excrétion et leur importance relative. La partie absorbée est d'abord excrétée par les urines (76%), puis par les sécrétions gastro-intestinales, les poils et la sueur. La filtration glomérulaire semble prépondérante dans le

mécanisme chez les mammifères, le plomb peut également être excrété par le lait, la sueur ou la salive (Danel ,1997).

I.2.4. Mécanisme d'action

Le plomb inhibe divers systèmes enzymatiques par fixation sur les groupes SH (mécanisme thioloprive) ou par déplacement d'autres métaux, d'où la diversité de ses effets. A dose d'exposition faible mais prolongée, ils portent essentiellement sur l'érythropoïèse (anémie) et l'hémoglobino-génèse (inhibition de la synthèse de l'hème), le système nerveux (déficits neuropsychiques) et la pression sanguine (hypertension) (Danel ,1997).

Au plan hématologique (figure°3), le plomb agit au niveau de trois systèmes enzymatiques de la biosynthèse de l'hème (ALA synthétase, ALA déhydrase et ferrochélatase), entraînant en particulier une accumulation d'ALA (acide deltaamino levulinique) dans le sang et l'urine et une augmentation des protoporphyrines érythrocytaires (Danel ,1997)

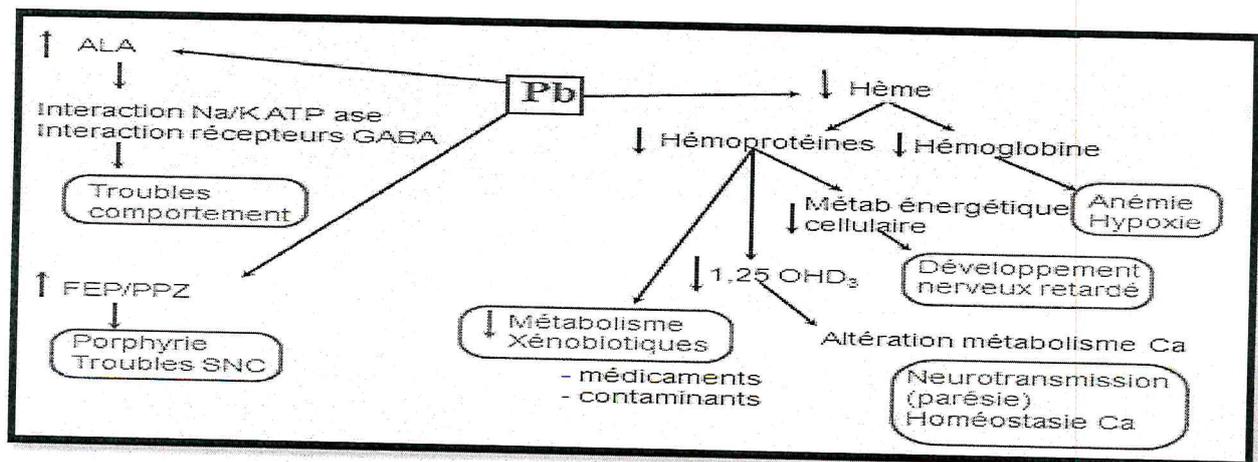


Figure 4 : Mécanismes d'action du plomb (Berny, 2005)

I.2.5. Toxicité

a) Toxicité aigue

- Chez l'homme

Une intoxication aigue se traduit par des troubles digestifs (vomissement, douleur abdominale, diarrhée) rénaux (oligurie), une anémie hémolytique, une encéphalopathie,

des signes d'hypertension intracrânienne et éventuellement un coma convulsif (INSRM ,1999).

- Chez les animaux

La toxicité ne peut être observée expérimentalement sur des animaux de laboratoire que pour des doses supérieures à 2000 mg/l, et se traduit alors par une mort précédée de faiblesse, trouble de sommeil et de constipation.

- Chez les oiseaux

D'après Degernes (2006), une concentration de plomb dans le sang inférieure à 0.5 ppm, n'est généralement pas associée à des signes cliniques (le pronostic est bon et même sans traitement), ceux-ci apparaissent à partir de 1 ppm (bon pronostic si traité) au-delà de 2 ppm le pronostic est réservé à sombre.

Plus généralement une valeur seuil revient chez plusieurs auteurs : une plombémie supérieure à 0.2 ppm est suggestive d'un empoisonnement au plomb, surtout si des signes cliniques sont présents. Certains oiseaux présentent des signes cliniques avec une plombémie de 0.15 ppm alors que d'autres espèces (poulet) sont cliniquement normales allant jusqu'à 8ppm (Altmann et al., 1997).

b) Toxicité chronique :

Expérimentalement le plomb induit chez les animaux de laboratoire :

- Une anémie hypochrome microcytaire,
- Une néphropathie interstitielle chimique évoluant vers l'atrophie et de la fibrose, secondaire à des lésions tubulaires et à l'apparition d'inclusions d'intranucléaires correspondant à des complexes plomb-protéine,
- Des tumeurs rénales, prostatiques, testiculaires et surrenaliennes liées aux propriétés mutagènes et cancérogènes (Chanel et al 1999).

Chez l'homme, le plomb induit :

- Une anémie microcytaire et hypochrome,

- Des troubles digestives (colique, vomissement),
- Des troubles nerveux (coma convulsif, altération des fonctions cognitives),
- Des troubles rénaux avec une néphropathie tubulaire interstitielle (Chanel et al 1999).

I.2.6. Effet sur la reproduction

Chez l'homme, de nombreux comptes rendu médicaux du début du siècle rapportent une baisse de fertilité chez les travailleurs des deux sexes de l'industrie du plomb (Peltier et al., 1994).

Des études récentes ont montré que le plomb est susceptible de diminuer la quantité de spermatozoïdes et augmente la malformation morphologique (Télisman et al 2000).

D'autre part, les travaux de Mehrotra et collaborateur (2008) chez les oiseaux; indiquent que les concentrations du plomb chez la caille est relativement faible dans l'ovaire ou dans les testicules. Par contre il a été démontré chez les mammifères que les concentrations en plomb obtenues dans l'épididyme étaient nettement supérieures à celles dans le testicule (INERIS, 2003).

Après des contaminations en laboratoire, Burger (1995) a constaté que le plomb réduise la spermatogénèse chez les oiseaux, mais les résultats a ce sujet chez les oiseaux sont trop peu nombreux.

Le plomb causerait également un allongement de l'intervalle entre les périodes de ponte et une réduction de l'épaisseur de la coquille des œufs, une diminution du nombre et poids des embryons a aussi été observé (Vodela, Lenz et al., 1996).

I.2.7. Valeur toxique de référence

La valeur fixée par l'OMS est de 10ug/l (OMS, 2000b), plusieurs études ont démontré que le Pb, même à des concentrations très faibles, ont des effets très néfastes sur la santé.

I.3. Le cadmium

I.3.1. Histoire :

Le cadmium a été découvert par Friedrich Stromeyer en 1817. L'étymologie du nom vient du grec Kadmeia, ville de Grèce ou l'on extrayait un minéral que l'on appelait cadmie.

I.3.2. Propriétés physico-chimiques du cadmium :

Le cadmium est un métal blanc argenté, mou et malléable (résistance à l'aplatissement) et très ductile (résistance à l'étirement). Il a des propriétés physiques proches de celle du zinc. Malgré une tension de vapeur faible, il émet des vapeurs bien en dessous de son point d'ébullition (INERIS, 1997).

Il est insoluble dans l'eau et dans les solvants usuels. Lorsqu'il est chauffé à des températures élevées, il émet des vapeurs jaunes rougeâtres d'oxyde de cadmium. Il réagit avec les acides et les bases. Le cadmium est soluble dans l'acide nitrique dilué et dans les acides chlorhydrique et sulfurique concentrés et chauds.

A température ordinaire et à sec, le cadmium n'est pas attaqué par l'oxygène, mais s'oxyde lentement avec l'humidité. Il est facilement attaqué par les acides, même les plus faibles tels que les acides organiques présents dans les denrées alimentaires.

Tableau 3 : Principales caractéristiques physiques du cadmium (Miquel, 2001)

symbole chimique	Masse atomique	Masse volumique	Température de fusion	Température d'ébullition
Cd	112	8,6 g/cm ³	320°C	765°C

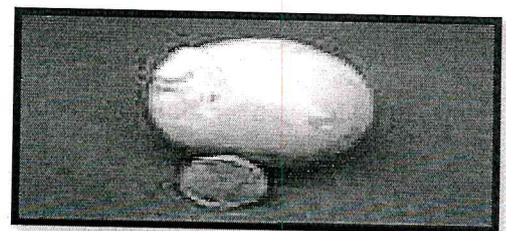
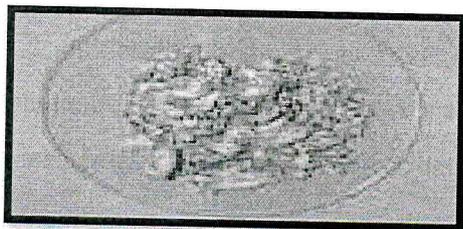


Figure 5: Aspect du Cadmium (Anonyme, 2013).

I.3.3. Toxicocinétique

Le cadmium est absorbé par les voies respiratoire et digestive. Le taux d'absorption varie de 3 à 6% chez les personnes testées tandis qu'il est de l'ordre de 0,5 à 3% chez les animaux. Le cadmium ingéré est cependant plus faible que celui déposé dans les voies respiratoires (ATSDR 1999). Le taux d'absorption dépend du type d'exposition, du composé et de la taille des particules. Divers facteurs peuvent influencer l'absorption intestinales du cadmium dont le jeune âge ou une déficience en fer qui augmente le taux d'absorption gastro-intestinale du cadmium.

La composition de l'alimentation a également un rôle : une alimentation pauvre en Fe, Ca, Zn, tend à augmenter le taux d'absorption. La composition en protéines et lipides influencent peu l'absorption; par contre des régimes riches en fibres naturelles et éléments traces diminuent l'absorption (Viala, 2007).

Une fois absorbé le cadmium est largement distribué dans le corps mais il tend à s'accumuler dans le foie et les reins, quelque soient la voie et la forme d'administration. Dans le sang, le cadmium est en majeure partie fixé à l'hémoglobine. Dans le plasma il est lié à l'albumine et d'autres protéines de haut poids moléculaire. Capté par le foie il se dissocie, le cadmium s'accumule et induit la synthèse de métallothionéine (Satarus et al. , 2004) .

Chez les oiseaux et les mammifères le processus d'excrétion du cadmium est très lent, ce dernier s'accumule donc dans les organes cibles (foie et rein) (Wren et al. 1995, cité par Richard -Mazet, 2008).

Seule une petite part du cadmium est excrétée parce qu'il n'existe pas de mécanisme biochimique d'élimination mais aussi parce qu'il est réabsorbé dans les tubules.

Sa demi-vie dans le corps peut dépasser les 10 ans et même atteindre 40 ans. Les faibles quantités excrétées (0,001%) le sont essentiellement au niveau urinaire et fécal (Satarus et al. , 2004).

I.3.4. Mécanisme d'action

Le cadmium a une activité toxique lorsqu'il n'est pas lié aux métallothionéines. Comme on l'a dit précédemment sa distribution dans le corps est large mais ses cibles principales sont les reins et le foie. Il est suspecté de perturber la composition lipidique de ces organes. L'altération des métabolismes d'autres métaux tels que le zinc, le fer, le cuivre ou encore du sélénium et du calcium semble à l'origine de ses principaux effets toxiques. Le cadmium interfère notamment avec les complexes protéines-zinc qui contrôlent la transcription de l'ADN, entraînant ainsi la mort cellulaire (Perrin, 2007).

I.3.5. Toxicité

Le cadmium et ses sels sont à la fois des irritants et des toxiques systémiques, l'action systémique se manifeste surtout sur la fonction rénale et les tissus pulmonaire et osseux.

a) Toxicité aiguë

L'action irritante sur la muqueuse nasale, l'arbre respiratoire et le tube digestif est responsable des accidents aigus (Fouchécourt, 2001).

L'inhalation de cadmium à des concentrations supérieures à 5 mg/m^3 provoque une destruction des cellules épithéliales pulmonaires entraînant œdème pulmonaire, trachéo-bronchite et pneumonie, autant chez l'animal que chez l'humain. L'ingestion d'une forte dose de cadmium provoque principalement une desquamation de l'épithélium au niveau du tube digestif, ainsi qu'une nécrose des muqueuses gastriques et intestinales. Chez la souris et le rat, la DL50 par voie orale varie de 100 à 300 mg/kg p.c. (ATSDR, 1999). Chez l'humain, la dose létale de cadmium par ingestion pour un adulte est estimée entre 350 et 3 500mg (Fouchécourt , 2001).

b) Toxicité chronique

La toxicité du cadmium la plus marquée relevée tant chez les modèles animaux que chez l'homme est celle concernant la fonction rénale.

b1) Toxicité rénale

L'atteinte rénale se manifeste par des lésions caractéristiques des tubules proximaux ce qui provoque une diminution de la réabsorption tubulaire et une protéinurie (ATSDR, 1999). Les modèles animaux montrent qu'une concentration approximative de $200 \mu\text{g/g}$ dans le cortex rénal doit être atteinte pour provoquer une protéinurie (INERIS, 2005).

b2) Toxicité musculo-squelettique

Les évidences provenant d'études humaines ou animales suggèrent que l'exposition chronique au cadmium provoque une altération du métabolisme de la vitamine D. Plusieurs cas d'ostéomalacie accompagnée d'ostéoporose et de fractures spontanées (maladie de Itai-Itai) ont été observés chez des personnes vivant au Japon qui ont été exposées de façon chronique au cadmium via la contamination de l'alimentation et de l'eau potable (ATSDR, 1999).

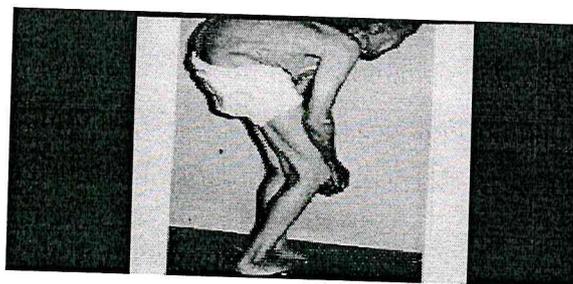


Figure 6: Déformation osseuse (maladie de *itai-itai*) (Anonyme , 2013).

b3) Toxicité hépatique

Chez l'animal, l'exposition au cadmium peut provoquer des dommages hépatiques (nécrose, changements métaboliques), mais généralement ces dommages ne sont observés qu'à des niveaux d'exposition très élevés (ATSDR, 1999).

Chez l'humain, on observe une accumulation de cadmium dans le foie suite à une exposition par inhalation ou par ingestion, mais il y a peu d'évidence d'atteintes hépatiques chez les individus exposés (ATSDR, 1999).

b4) Toxicité cardiovasculaire et hématopoïétique

Chez l'humain ou chez l'animal, l'exposition au cadmium par ingestion ou par inhalation peut entraîner de l'anémie. Chez l'animal, il a été démontré que l'ingestion de cadmium réduit l'absorption gastro-intestinale du fer. Le transport du cadmium des poumons vers le système digestif par le système muco-ciliaire est le mécanisme proposé pour expliquer l'anémie suite à l'exposition par inhalation. Les personnes qui ont une alimentation déficiente en fer sont généralement les plus susceptibles de développer de l'anémie (ATSDR, 1999).

L'exposition chronique au cadmium est aussi associée à des désordres cardiovasculaires variés tels que l'hypertension ou la cardiomyopathie. L'action de ce métal sur le système vasculaire joue d'ailleurs un rôle important dans les effets physiopathologiques observés sur les autres organes cibles (Perrin, 2007).

I.3.6. Effet sur la reproduction et le développement

On a pendant longtemps considéré que le cadmium n'avait pas de retentissement sur la reproduction et le développement. Les connaissances sur ce sujet sont en train de s'affiner.

L'expérimentation animal de Choe et Johnson en 2003; suggère la possibilité d'une activité oestrogénique, mais les études in vitro de Silva (2006) n'ont pu confirmer cette hypothèse.

D'autre part certaines études dévoilent qu'une exposition aigue à des doses très élevées provoque une atrophie et une nécrose testiculaire et une diminution de la fertilité (ATSDR, 1999).

I.3.7. Valeur toxique de référence

Pour une population générale, la FAO/OMS a recommandé une dose orale hebdomadaire tolérable de 400-500 µg de cadmium, ce qui correspond à une teneur moyenne de 0,04 à 0,05 mg/kg dans les aliments consommés. La limite maximale de cadmium fixée par l'OMS pour l'eau potable est de 10 µg/litre mais récemment, un groupe de travail a recommandé que cette limite soit réduite de moitié.

I.4. Le mercure

I.4.1. Histoire

Ce métal est connu depuis l'antiquité (on estime qu'il a été utilisé dès 2700 avant notre ère pour amalgamer l'or ou l'argent) d'une part pour ses nombreuses applications mais aussi en raison de son caractère toxique

I.4.2. Propriétés physico-chimiques du mercure

Ce métal présente des caractéristiques rares, en effet c'est le seul qui à température ambiante (entre -10°C et $+40^{\circ}\text{C}$) est liquide et peut même passer à l'état gazeux étant donné son extrême volatilité. Le mercure est insoluble dans l'eau tandis que sa solubilité dans les lipides est faible, de l'ordre de 5 à 50 mg/l. Sa concentration de vapeur saturante est faible, il émet des vapeurs en quantité appréciable à température ordinaire.

Tableau 4 : Principales caractéristiques physiques du mercure (Miquel,2001)

symbole chimique	Masse atomique	Masse volumique	Température de fusion	Température d'ébullition
Hg	200	13.6g/cm ³	-38°C	357°C

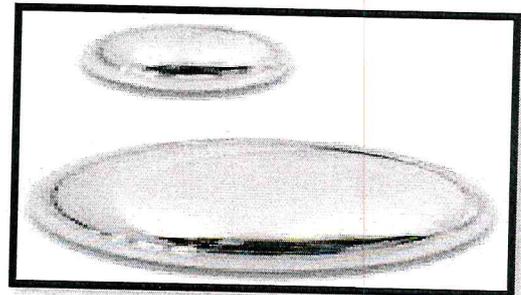
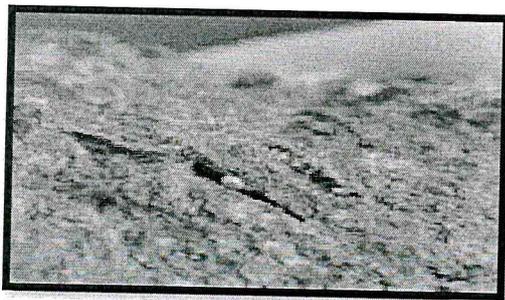


Figure 7: Aspect du Mercure (Anonyme ,2013).

I.4.3. Toxicocinétique

L'absorption intestinale du mercure élémentaire est presque nulle tandis que celle des composés organiques est rapide et presque totale, notamment à cause de leurs capacités à établir des liaisons avec des protéines de transport. Quant aux composés ioniques, ils sont absorbés avec un taux de 10% environ (ATSDR, 1999).

Toutes les formes du mercure sont d'autre part aisément absorbées par inhalation, avec un taux de l'ordre de 70-80%, variant principalement selon la taille des particules aériennes transportant le métal. La voie trans-cutanée est théoriquement possible mais ne semble pas être une voie d'absorption majeure en comparaison avec l'ingestion ou l'inhalation.

Une fois absorbé le mercure élémentaire est oxydé en Hg^{2+} , et se lie aux groupes soufrés des protéines plasmatiques et érythrocytaires. Sa distribution est ensuite très large, il s'accumule principalement dans le rein (région tubulaire) mais aussi dans le foie, la muqueuse du tractus gastro-intestinal, la peau, les poils, les glandes salivaires et sudoripares, les testicules, la prostate ainsi que dans certaines parties du cerveau (dans la substance grise).

Cependant il ne traverse que difficilement les barrières hémato-méningée et placentaire.

Chaque organe retient le mercure pour une durée variable qui oscille entre quelques jours et plusieurs mois. Le cerveau, les reins et les testicules sont les organes présentant la durée de rétention la plus longue.

L'élimination du mercure se fait principalement par l'excrétion urinaire et biliaire de Hg^{2+} ainsi que par exhalation. Elle est cependant limitée, ce qui laisse au toxique une demi-vie dans le corps estimée à 70 jours. Les composés organiques métabolisés dans le foie sont excrétés par la bile et éventuellement réabsorbés quand la désalkylation n'est pas totale (cycle entérohépatique).

D'autres voies d'excrétion comme les glandes sudoripares, lacrymales, mammaires et salivaires sont aussi possibles.

I.4.4. Mécanisme d'action

La haute affinité qui existe entre l'ion Hg^{2+} et les groupes thiol et sulfhydriles des protéines est considérée comme le mécanisme principal de son activité biologique. Les protéines qui contiennent des groupes sulfhydriles se retrouvent la plupart du temps dans les membranes biologiques extra- ou intra- cellulaires ainsi que dans les organites. En établissant de telles liaisons le mercure est susceptible d'inactiver certains enzymes, de dénaturer certaines protéines structurelles ou encore d'altérer certains phénomènes de transports.

I.4.5. Toxicité aiguë

a) Mercure inorganique

La dose létale de chlorure de mercure pour un humain est connue en raison des fréquents empoisonnements accidentels ou intentionnels qui survenaient au début du siècle à cause de ce produit. Elle a été estimée à 10-42 mg Hg/kg . La mort est causée par un choc cardiovasculaire consécutif à une insuffisance rénale aiguë et des dommages gastro-intestinaux (ATSDR, 1999).

Chez les rats la DL₅₀ ingestion est estimée à 25,9 à 77,7 mg Hg/kg alors que les souris se montrent moins sensibles. La mort survient à la suite d'effets comparables à ceux observés chez l'humain .

b)Mercure organique

La dose létale de mercure organique pour les humains n'est pas disponible dans la littérature même si des décès ont été directement reliés à l'ingestion de ce produit notamment lors des catastrophes de Minamata et celles survenues en Irak (voire ci-après). Mais la quantité responsable est difficile à estimer principalement parce qu'un certain délai s'écoule entre l'ingestion et ses conséquences.

Le taux de décès à la suite d'une intoxication aiguë au méthylmercure est très dépendant de la lignée et du sexe chez les souris (les mâles semblent plus sensibles que les femelles). Il est donc difficile de calculer une DL₅₀ pour cette substance. L'ATSDR, 1999 présente les résultats d'une étude dans laquelle une dose de 16 mg/kg de méthylmercure provoque la mort de 4 mâles rats sur 6 sans décès chez les femelles, mais dont 4 sur 6 meurent après une administration de 40 mg/kg.

I.4.6. Effets sur la reproduction et le développement

Aucune étude ne décrit d'effets de mercure non organique sur la reproduction ou le développement chez les humains.

Sur les modèles animaux, l'intoxication aiguë au méthylmercure de femelles gestantes se traduit souvent chez la plupart des espèces par des avortements ou une diminution de la taille des portées. Selon certaines études, l'exposition chronique des mâles provoque une baisse de la spermatogénèse et une atrophie des tubules testiculaires.

Des études épidémiologiques ont été effectuées sur différentes populations exposées au méthylmercure par consommation de poisson contaminé (Iles Faroé, Iles Seychelles et Nouvelle Zélande). Certaines publications indiquent que les enfants issus de mères exposées (c'est-à-dire celles présentant des taux de mercure dans les cheveux de 6 μ g/g) montraient une diminution de performances lors de tests neuropsychologiques et neurocomportementaux (INERIS, 2006). Dans les cas d'intoxication accidentelle à haute dose, les atteintes du cerveau du fœtus peuvent être plus sévères et provoquer des cécités, des paralysies.

I.4.7. Valeurs de référence

Aucune donnée n'est disponible pour les effets sans seuil (effets cancérogènes) pour le mercure ou ses composés puisqu'ils restent hypothétiques.

CHAPITRE II :
MODALITE D'EXPOSITIONS AUX
METAUX LOURDS

Chapitre II – Modalité d'expositions aux métaux lourds

II.1. Origine et production des métaux lourds

Une quantité importante de métaux lourds est introduite dans l'environnement par l'intermédiaire de sources naturelles et humaines. Cette contamination a plusieurs origines telles que la combustion de fossiles, les gaz d'échappement des véhicules, l'incinération, l'activité minière, l'agriculture et les déchets liquides et solides. Mais elle peut également être d'origine naturelle via les volcans, l'activité des sources thermales, l'érosion, l'infiltration, etc. D'autre part, le cadmium, le plomb sont introduits dans l'environnement, de façon quasi exclusive par l'homme (Di Benedetto ,1997).

Certains secteurs recouvrent en fait un vaste éventail d'activités. Mais c'est le **secteur de l'industrie manufacturière** qui est responsable de la majeure partie des émissions de métaux lourds.

II.2. Usage des métaux lourds

Malgré leur nature polluante et toxique, les métaux lourds n'ont pas toujours été considérés comme des déchets encombrants mais ont eu par le passé de multiples applications. Même si désormais leur usage a été réglementairement très limité, ils restent parfois encore présents dans certains objets de notre quotidien.

II.2.1. Cadmium

Le cadmium a été utilisé dans la production de nombreux équipements industriels et biens de consommation, mais son utilisation a été restreinte par la réglementation depuis 1994 en raison du danger que ce métal représente (INRS, 1997).

On recense trois principaux usages pour le cadmium :

- le cadmiage, qui est une technique consistant à recouvrir certains métaux (acier, fonte, cuivre, aluminium) par une fine couche de cadmium pour les protéger de la corrosion;
- certains accumulateurs qui fonctionnent avec des couples Cd/Zn ou Cd/Ag;

- les stabilisateurs de pigments qui peuvent être constitués par certains composés cadmiques tels que les oxyde, sulfate, sulfure et chlorure de cadmium (INRS, 1997).

II.2.2. Plomb

Le plomb peut être utilisé sous sa forme métallique ou sous forme de composés tels que le dioxyde de plomb, l'acétate de plomb, ou le carbonate de plomb.

Certains domaines de technologie moderne représentent une part grandissante des usages du plomb: technologie nucléaire utilisée à des fins médicales et militaires ; supraconducteurs permettant le développement des calculateurs hyper-rapides, d'équipements de diagnostic médical plus sensible. Au contraire, d'autres usages très répandus, il y a quelques années ont été complètement interdits car ils représentaient des sources d'exposition trop importantes pour les humains: stabilisateur de carburants, soudure dans les boites de conserves, canalisations d'eau potable ou peintures domestiques (ATSDR, 2005).

II.2.3. Mercure

Il existe principalement dans trois grands domaines d'applications industrielles :

- *L'industrie électrique* (comme constituant de piles, de lampes, de tubes fluorescents, de contacteurs...).
- *L'industrie chimique* (comme cathode liquide dans les cellules d'électrolyse du chlorure de sodium pour la production de chlore et de soude).
- *La fabrication d'instruments de mesure* (thermomètres, baromètres).

Il est également utilisé, de manière non négligeable, dans les amalgames dentaires, ainsi qu'en laboratoire d'anatomopathologie

II.3. Distribution et impact sur l'environnement

Une fois émis dans l'environnement, les métaux lourds se dispersent dans les milieux aquatique, atmosphérique ou terrestre via des phénomènes d'émission, de déposition, de lixiviation... Cette contamination peut être une source d'exposition directe pour les humains et

les animaux (via l'air respiré, l'eau consommée, ou les poussières ingérées) mais est aussi à l'origine de la contamination des chaînes trophiques et donc des denrées alimentaires que l'on consomme (Di Benedetto, 1997).

II.3.1. Contamination des sols

Les métaux peuvent être soit fixés dans les roches et les sédiments, soit mobiles. Dans le premier cas, les quantités disponibles sont infimes et ils n'ont aucune signification sur l'environnement. Mais lorsque les conditions changent de telle manière que les métaux redeviennent solubles, l'augmentation de la concentration devient alors une menace directe pour l'environnement du fait de l'augmentation de leur disponibilité pour les plantes.

En outre, depuis quelques années, les pluies acides augmentent la mobilité des métaux dans le sol et causent donc une augmentation de leur concentration dans les produits agricoles (Di Benedetto, 1997).

Sur la figure suivante, le D. Baize a rapporté l'ensemble des facteurs qui participent au cycle de l'acquisition des teneurs en ETM présents dans les sols. (Doelsch ,2004).

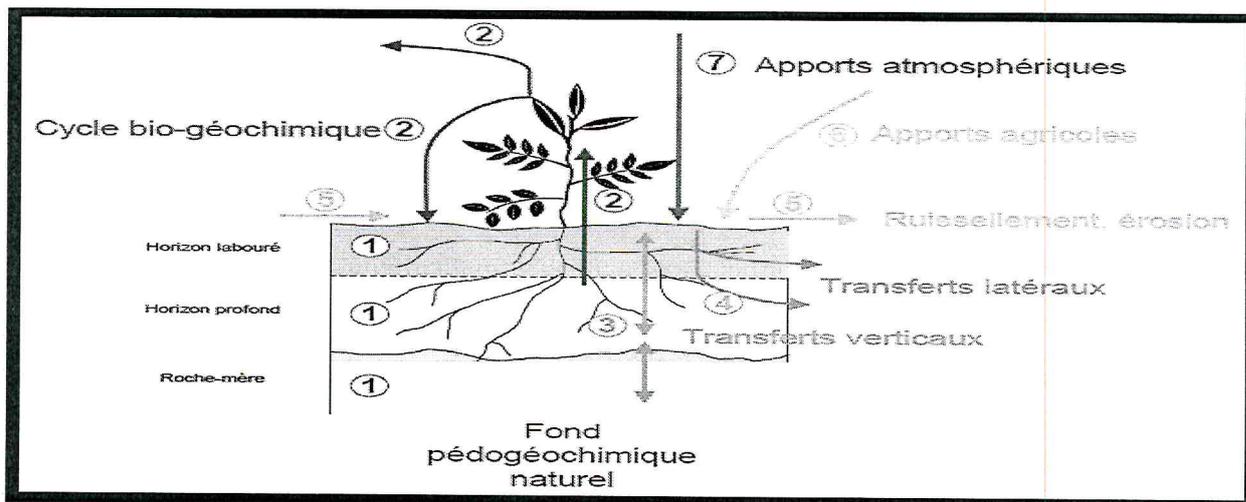


Figure 8 : Cycle d'acquisition des teneurs en ETM dans les sols (Baize, 1997).

II.3.2. Contamination de l'air

Les principales sources de métaux dans l'air sont des sources fixes. De nombreux éléments se trouvent à l'état de traces dans des particules atmosphériques provenant de combustions à haute

température, de fusions métallurgiques, des véhicules, des incinérateurs municipaux, etc (Di Benedetto, 1997).

Les effets biologiques, physiques et chimiques de ces particules sont fonction de la taille des particules, de leur concentration et de leur composition, le paramètre le plus effectif sur l'environnement étant la taille de ces particules.

II.3.3. Contamination de l'eau

Il est assez difficile de prévoir l'évolution des métaux dans l'environnement, car ils peuvent subir un grand nombre de transformations (oxydation, réduction, complexations, etc.), et car cette évolution dépend fortement du milieu.

En effet, la migration des métaux lourds vers la nappe phréatique est fonction de nombreux paramètres:

- la forme chimique initiale du métal,
- la perméabilité du sol et du sous-sol,
- la porosité du sol,
- le pH: dans un milieu acide, les métaux risquent de se solubiliser, alors que dans un milieu alcalin, ils peuvent former des hydroxydes métalliques,
- l'activité biologique: certains micro-organismes ont la capacité d'ingérer des métaux, alors que d'autres les solubilisent par acidogénèse.
- la composition minéralogique du sol: il peut y avoir formation de composés,
- la teneur en matières organiques du sol: (complexations des métaux par les substances humiques).

Les principales sources de contamination de l'eau sont les suivantes: les eaux usées domestiques et industrielles, la production agricole, les polluants atmosphériques, les anciennes décharges, l'utilisation de substances dangereuses pour l'eau, la navigation, etc (Di Benedetto, 1997).

II.4. Contamination de la chaîne alimentaire

Les pollutions de chacun des compartiments de l'environnement décrites précédemment peuvent être des sources de contamination des chaînes alimentaires, comme l'illustre le schéma de la figure ci-dessous.

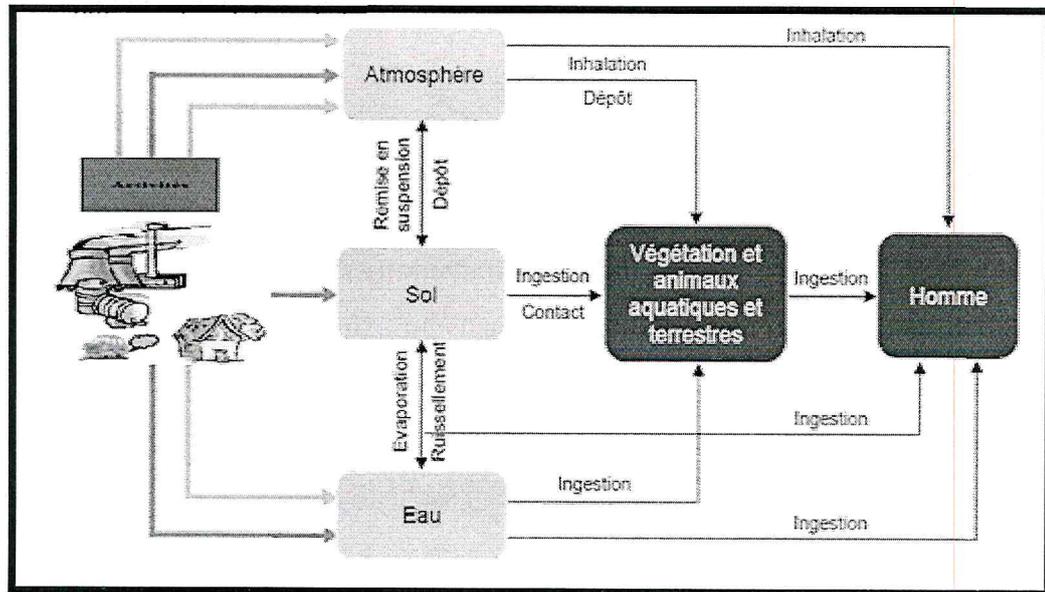


Figure 9 : Sources de pollution des chaînes alimentaires (Berny, 2006)

II.4.1. Bioaccumulation

Comme les métaux lourds ne peuvent être dégradés et que leur élimination est le plus souvent limitée, les organismes biologiques exposés les accumulent après absorption dans leur tissu; ce processus appelé **bioaccumulation**, permet d'expliquer pour les animaux et par conséquent les produits qui en sont issus, la présence de niveaux de contamination plus élevés que ceux mesurés dans leur milieu.

Les écotoxicologues distinguent plusieurs phénomènes

D'après Neff ; 2002 La **bioaccumulation** résulte de la balance nette des processus de capture, de stockage et d'excrétion d'une substance dans un organisme, due à une exposition dans l'eau, la nourriture, le sédiment et l'air.

La **bioconcentration** est un cas particulier de bioaccumulation. Elle correspond à l'accroissement direct de la concentration du contaminant dans l'organisme à partir du milieu environnant.

II. 4.1.1 Les facteurs de variation de la bioaccumulation :

Les niveaux de concentrations métalliques dans les organismes ne sont pas le seul résultat de leur biodisponibilité dans l'environnement. Trois groupes de facteurs concernant le milieu, le contaminant et l'organisme accumulateur sont susceptibles de faire varier l'intensité de la bioaccumulation (Casas, 2005).

a. Propriétés chimiques du contaminant :

La **nature** et la **forme** des métaux lourds (ionique/élémentaire, complexes, dissous particulaire) influencent leur diffusion à travers la barrière biologique que forme le plasmalemme, et donc conditionnent leur capacité de bioaccumulation. Les formes ioniques sont celles à la biodisponibilité la plus élevée. Elles diffusent à travers la membrane biologique par des canaux protéiques non spécifiques (Casas, 2005).

b. Facteurs biologiques de l'organisme :

La **composition biochimique** (teneur en lipides) et la **condition physiologique** de l'organisme sont importantes dans la détermination de la distribution tissulaire du contaminant et sa rétention dans l'organisme.

Les **processus de nutrition** affectent les entrées et sorties des contaminants (taux d'ingestion, d'excrétion) et donc leur quantité dans les organismes biologiques.

La concentration en polluant dépend de cette quantité mais aussi de la **masse des organismes** accumulateurs. Si celle-ci varie on peut avoir un effet de dilution ou de concentration (Casas, 2005). Ainsi Cossa, en 1980 a constaté que les petites moules présentent des concentrations en contaminants métalliques plus élevées que les grosses.

Des **variations saisonnières**, issues de la combinaison de facteurs biologiques et abiotiques ont été mises en évidence par Kaimoussi en 2004, ils ont montrés que les teneurs des métaux traces (Cd, Pb, Cu, Zn) augmentent généralement de l'hiver à l'été.

c. Caractéristiques physico-chimiques du milieu

Les facteurs abiotiques inhérents au milieu sont particulièrement importants car ils influencent à la fois la forme physico-chimique des métaux, et donc leur biodisponibilité, mais aussi le métabolisme des espèces, dont dépendent les cinétiques d'accumulation.

II.4.1.2. Bioaccumulation en milieu terrestre

L'étude de la bioaccumulation chez les organismes terrestres a elle aussi de nombreuses applications : mesurer l'impact de la pollution sur les écosystèmes terrestres, estimer le niveau de contamination des milieux à partir de bio-indicateurs (lombricidés, rongeurs), évaluer le risque lié à la consommation de certaines denrées alimentaires. Les exemples développés ici ont été choisis pour leur pertinence envers ce dernier aspect.

a. Végétaux

La contamination des végétaux présente de l'intérêt en santé publique vétérinaire d'une part parce qu'ils entrent dans la ration alimentaire de la population humaine mais aussi parce qu'ils peuvent être source de contamination des animaux de production.

Les végétaux sont susceptibles d'absorber les métaux lourds par voie racinaire (diffusion à partir d'un sol contaminé) ou foliaire (déposition à partir de l'atmosphère).

Même s'il existe à ce sujet des avis divergents, il est communément admis que la voie aérienne est négligeable par rapport à la voie racinaire pour le plomb et le cadmium (INERIS, 2003 et 2005).

La pollution atmosphérique jouera donc un plus grand rôle pour l'entrée du mercure dans la chaîne alimentaire via les plantes que la contamination des sols, alors que c'est cette dernière qui sera prépondérante pour le plomb et le cadmium.

b. Animaux

Les animaux peuvent représenter une source de contamination en métaux lourds pour les hommes directement par leurs tissus (abats, muscles) ou par leurs produits (lait, œufs) (Irfana et al., 2004).

La translocation du cadmium dans les plantes peut être suffisante pour faire de celles-ci des sources de contamination importantes pour les animaux qui les ingèrent. Au contraire la bioconcentration végétale du plomb est faible, et ces éléments traces restent en plus grande quantité dans les sols que dans les plantes.

Cependant la terre représente une fraction normale du régime alimentaire de tous les animaux pâturant. Thornton et Abrahams (1983) l'ont évaluée et ont conclu qu'elle représentait de 1 à 18% de la quantité totale de matière sèche ingérée pour les bovins et jusqu'à 30% pour les ovins. Ainsi les sols contaminés peuvent être une source d'exposition directe pour le bétail pâturant.

Si la consommation d'eau très contaminée peut elle aussi, être une source d'exposition directe importante, la pollution atmosphérique intervient principalement de façon indirecte dans l'exposition des animaux, en contaminant les sols et les eaux.

CHAPITRE III :
LA METHODE D'ANALYSE DES
METAUX LOURDS

Chapitre III – La méthode d'analyse des métaux lourds

III.1.Méthode d'analyse

III.1.1. Traitement d'échantillon

Lors d'une analyse des métaux lourds, un traitement des échantillons est généralement nécessaire avant la mesure. Il consiste à détruire la matière organique soit par calcination soit par attaque à chaud à l'aide d'acides oxydants. Deux voies sont ainsi utilisées : la minéralisation par voie sèche et la minéralisation par voie humide.

III.1.1.1. Minéralisation par voie sèche

La minéralisation par voie sèche est essentiellement appliquée aux matériaux de nature organique, aux tissus biologiques ou aux échantillons végétaux. En bref, cette méthode consiste en une calcination suivie d'une reprise des cendres par un acide approprié. La calcination réalisée à une température convenablement choisie assure la décomposition de la matière organique(Bui, 2007).

III. 1.1.2. Minéralisation par voie humide

La minéralisation par voie humide, généralement rapide et efficace, utilise des mélanges d'acides ou des mélanges d'agents à la fois acides et oxydants. Les dégitions acides (mise en solution à chaud) peuvent être réalisées ouvert (ballon, tube, etc.) ou fermé (bombes en téflon avec ou sans graine en acier) (Bui ,2007).

III.1.2. Méthode de mesure

La Spectrométrie par Absorption Atomique (SAA) est de loin la méthode la plus couramment utilisée en Afrique pour le dosage des éléments traces métalliques (ETM) (Mehennaoui ; 2004).

III.1.2.1. Méthode par Spectrométrie Absorption Atomique (SAA)

La spectrométrie par absorption atomique est une méthode aujourd'hui bien maîtrisée. Avec le même principe de base, on peut faire appel à deux techniques d'atomisation dans une flamme(SAAF) ou dans un four, par voie électrothermique (SAAE) qui aboutissent à des limites

de détection très différentes, la SAAE étant, selon l'élément analysé, au moins 100 fois plus sensible que le SAAF.

III.1.2.1.1 Domaine d'application

La spectrométrie par absorption atomique est une méthode d'analyse quantitative et relative, et qui permet de doser une soixantaine d'éléments chimiques à l'état de traces (quelques mg/litre). La SAA reconquiert une large gamme d'applications : l'analyse des eaux, des tissus végétaux et animaux, des aliments et boissons, des sols, engrais et sédiments, etc.

Cette méthode présente de nombreux avantages : très sélective, grande spécificité, rapidité, faible quantité de substance nécessaire (1 ml de la solution peut suffire) et facilité de préparation des solutions étalons.

Cependant, on peut noter un certain nombre de limites : nécessité d'utiliser pour chaque élément à doser une source caractéristique, l'existence d'interférences chimiques sévères complique parfois la situation.

III.1.2.1.2. Principe

Une source de rayonnement émet des radiations dont la longueur d'onde correspond à la différence d'énergie entre l'état fondamental et un état excité des atomes de l'échantillon à analyser.

Le rayonnement passe ainsi au travers de l'atomiseur et est en partie absorbé. Le rayonnement émergent (non absorbé) passe alors par un monochromateur jusqu'à un photo détecteur et un système de réduction des données.

L'absorption est ensuite mesurée et celle-ci est une fonction linéaire de la concentration de l'analyte (Irrissou, 2003).

L'intensité de l'absorption dépend directement du nombre de particules absorbant la lumière selon la **loi de Beer Lambert**,

$$A = \log I_0/I$$

A: Absorbance.

I: Intensité après absorption par les atomes.

I_0 : Intensité initiale de la source lumineuse.

III.1.2.1.3. Appareillage en absorption atomique

Le dispositif expérimental utilisé en absorption atomique se compose d'une source. La lampe à cathode creuse, d'un bruleur et un nébuliseur, d'un monochromateur et d'un détecteur relié à un amplificateur et un dispositif d'acquisition.

Un schéma plus détaillé des composants d'un spectromètre d'absorption atomique est présenté ci-dessous (Figure 9).

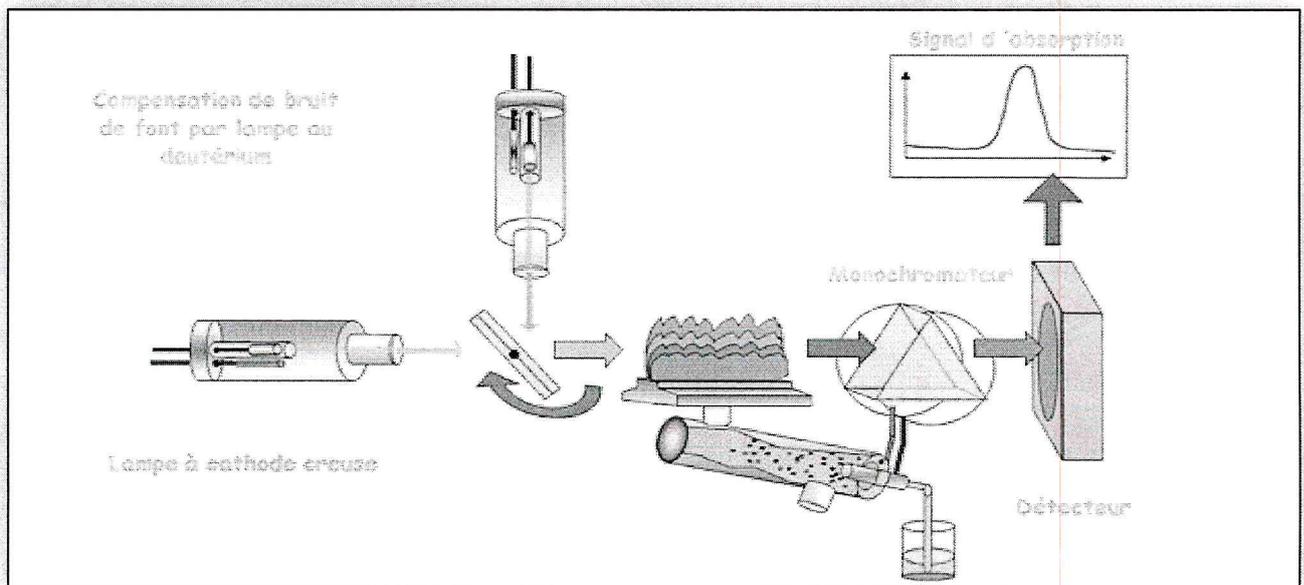


Figure 10 : Montage d'un appareil SAA avec bruleur.

- **La lampe à cathode creuse**

Un dispositif astucieux permet de faire émettre les raies par l'élément que l'on veut doser (figure 10).

Elles sont constituées :

- d'un cylindre creusé à l'une de ses extrémités et fait du métal dont on veut produire le spectre d'émission « la cathode » ;

- d'une anode étant un fil de tungstène ou de nickel;
- d'une enceinte scellée en verre avec une fenêtre la plus transparente possible aux longueurs d'ondes considérées (quartz, verre borosilicate); cette enceinte est remplie par un gaz rare (argon (Ar) ou néon (Ne) à faible pression (quelques Pa) (Galez , 2011).

Une différence de potentiel entre les deux électrodes provoque l'ionisation du gaz rare dont les ions vont frapper la cathode.

Ceux -ci arrachent alors les atomes de la cathode qui restent confinés dans le cylindre sont alors excités par les ions Ne^+ par échange d'énergie. En revenant à l'état fondamental, ils émettent leur raie spécifique (Rouessac , 2004).

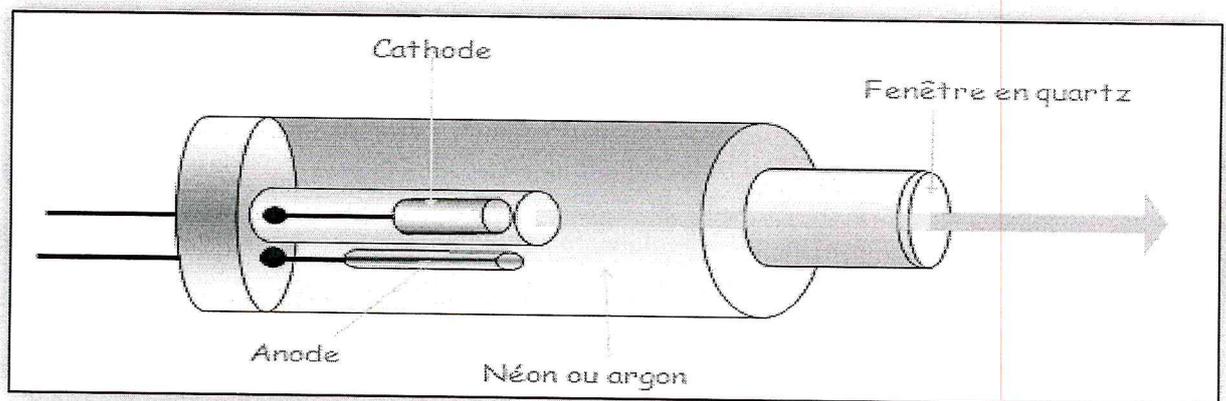


Figure 11 : lampe à cathode creuse.

- **Le modulateur ou chopper**

Un choppé est intercalé entre la source lumineuse et l'atomiseur (Figure 9) .Son but est d'éliminer les lumières parasites qui proviennent des atomes excités ou de la flamme sous forme de fond continu (Rouessac, 2004).

Le faisceau lumineux doit être modulé de manière à réaliser une amplification sélective du signal. Ceci peut être fait de manière mécanique à l'aide d'un chopper, disque ajouré animé d'un mouvement de rotation ou de manière électronique en modulant le courant alimentant la lampe (Galez, 2011).

- **Le nébuliseur**

L'échantillon à analyser est en solution. Celle-ci est aspirée au moyen d'un capillaire par le nébuliseur. A l'orifice du nébuliseur, du fait de l'éjection d'un gaz à grande vitesse, il se crée une dépression (effet Venturi). La solution d'analyse est alors aspirée dans le capillaire et à la sortie, elle est pulvérisée en un aérosol constitué de fines gouttelettes. Cet aérosol pénètre alors dans la chambre de nébulisation dont le rôle est de faire éclater les gouttelettes et d'éliminer les plus grosses. Ce brouillard homogène pénètre alors dans le brûleur (figure 11).

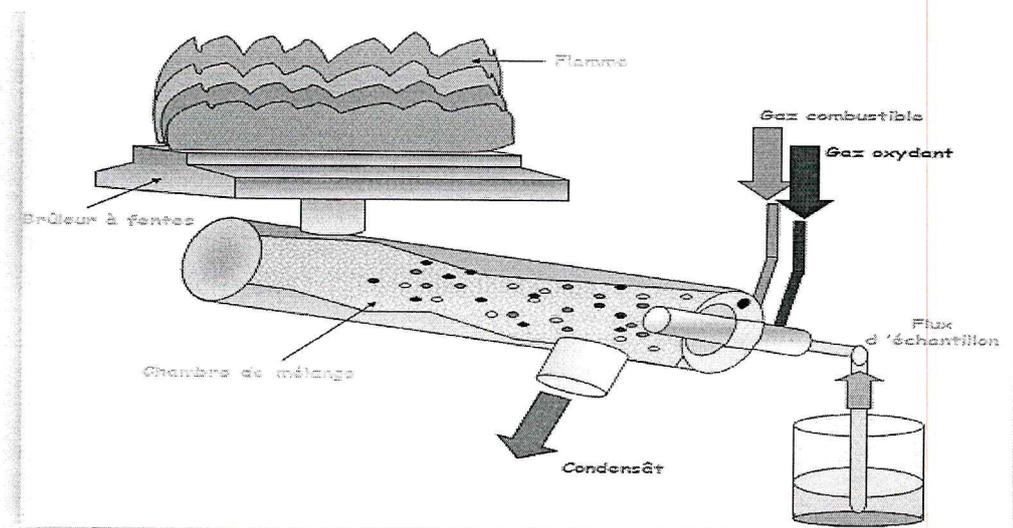


Figure 12 : Nébuliseur brûleur.

- **Dispositif d'atomisation**

Le rôle de l'atomiseur est de produire des atomes, ces derniers doivent se trouver à l'état fondamental pour pouvoir absorber les photons provenant de la source. Deux dispositifs d'atomisation existent : le nébuliseur-brûleur (la flamme) (figure11) ou le dispositif électrothermique (le four graphite)

En SAA dite en flamme ; le brûleur est alimenté par un mélange gazeux combustible/comburant (par exemple acétylène/ NO_3) et produit une flamme dont la base est un rectangle d'environ 100 mm de longueur et 1 mm de largeur, aligné dans sa plus grande dimension avec l'axe optique de l'appareil (Rouessac, 2004). L'échantillon mis en solution aqueuse est aspiré et nébulisé (dispersé en très fines gouttelettes) dans ce mélange gazeux. Les éléments à l'état atomique se retrouvent ainsi dans la flamme qui est «traversée » par le faisceau

lumineux (Galez, 2011). Au bout d'un certain parcours au seuil de la flamme, le solvant de la gouttelette est éliminé, il reste les sels ou particules solides qui sont alors fondus, vaporisés puis atomisés.

En SAA dite en four, le four est constitué par un petit cylindre creux en graphite de quelques centimètres de longueur. Il est chauffé par effet joule et traversé par le rayonnement issu de la source (figure 12).

Le four en graphite reçoit l'échantillon introduit par un injecteur automatique, après l'introduction de l'échantillon à l'intérieur du tube celui-ci est chauffé suivant un programme thermique qui se déroule en plusieurs étapes :

- Désolvatation (ou séchage)

Il s'agit de l'évaporation de la phase liquide, cette étape doit être effectuée lentement (20 à 40 secondes environ).

- Minéralisation par formation d'oxydes

A une température dépendant de la nature des métaux présents (20 à 40 secondes environ).

- Production de la vapeur atomique par réduction des oxydes (ou atomisation)

A une température comprise entre 200 et 2600°C (quelques secondes).

- Purge du système

Par un courant d'argon à une température à 2000°C (maximum 3000°C).

- Refroidissement

Par circulation d'eau autour du four (Rouessac, 2004).

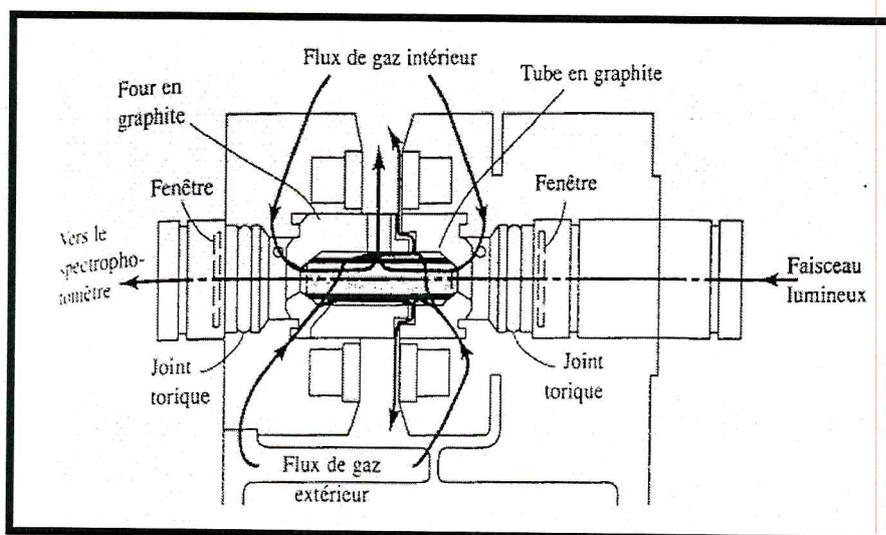


Figure 12: Four en graphite (Rouessac, 2004).

- **Le monochromateur**

Placé entre l'atomiseur (flamme) et le détecteur (photomultiplicateur) (figure 9), sert à éliminer toutes les raies lumineuses dont les longueurs d'onde ne correspondent pas à celle de l'élément choisie (Rouessac ; 2004).

- **Le détecteur**

Le détecteur est situé à la sortie du monochromateur. Son rôle est de mesurer les intensités lumineuses nécessaires au calcul des absorbances. Pratiquement tous les appareils à l'heure actuelle sont équipés d'un **tube photomultiplicateur**. Ce système de détection convient parfaitement pour tous les spectromètres permettant l'analyse monoélémentaire (Vandegans et al 1997).

III.1.3. Critère de validation d'une méthode d'analyse

La validation d'une méthode d'analyse entraîne la détermination de plusieurs paramètres, en générale, elle porte sur les caractéristiques suivantes (Vial et al., 2002).

- **Sensibilité** : La sensibilité représente la variation minimale qu'il faut imposer à la grandeur mesurée pour enregistrer une variation significative du résultat de la mesure.
- **Linéarité** "Capacité dans un intervalle donné d'obtenir des résultats de dosage directement proportionnels à la concentration ou à la quantité d'analyte dans l'échantillon".

En SAA, le domaine de linéarité n'excède pas deux ordres de grandeur.

- **Limite de détection** " La limite de détection d'une méthode d'analyse est la plus petite quantité d'analyte qui peut être détectée mais pas nécessairement quantifiée comme une valeur exacte".

Comme la sensibilité, elle est exprimée en mg/dm^3 (SAAF) ou en $\mu\text{g/dm}^3$ (SAAE).

- **Limite de quantification** "Quantité la plus faible d'analyte dans un échantillon qui peut être déterminée quantitativement avec une fidélité et une exactitude appropriées".

Sa valeur est habituellement admise comme 4 à 10 fois la limite de détection.

- **Justesse (exactitude)** "Etroitesse d'accord entre la valeur trouvée et la valeur acceptée soit comme valeur conventionnellement vraie soit comme valeur de référence".

- **La fidélité** à un niveau donné correspond à "l'étroitesse d'accord entre une série de mesures obtenues dans des conditions prescrites à partir de prises d'essais multiples provenant d'un même échantillon homogène"

Selon les conditions d'exécution de l'essai, cette caractéristique s'exprime sous forme de répétabilité ou de reproductibilité pour une méthode.

- *Répétabilité* exprime la fidélité évaluée dans des conditions opératoires identiques et dans un court intervalle de temps.
- *Reproductibilité* exprime la variabilité inter laboratoires habituellement appliquées à la standardisation de la méthodologie.

La précision est généralement calculée à partir de la moyenne des résultats obtenus (mesures répétées) avec les déviations standards ($M \pm SD$) et les coefficients de variation (CV%) pour chaque concentration (Viala, 2007).

- **Robustesse** "Capacité du protocole de rester non affecté par des variations faibles mais délibérément introduites dans les paramètres de la méthode; fournit une indication sur sa fiabilité dans des conditions normales d'utilisation".

CHAPITRE IV :
PART DE L'ALIMENTATION DANS
L'EXPOSITION TOTALE

Chapitre IV – Part de l'alimentation dans l'exposition totale

L'importance relative des différentes sources est évaluée par le croisement des données disponibles sur les niveaux moyens rencontrés dans l'environnement, les volumes d'ingestion (ou d'inhalation selon la source de l'exposition), et celles concernant les coefficients d'absorption digestive (ou de pénétration) reconnus comme vraisemblables dans la littérature.

IV.1. Part des aliments d'origines animales (exemple viande de volaille)

Malgré la variété des sources de métaux lourds que nous avons exposés, la littérature rapporte que la voie d'exposition majeure aux métaux lourds pour la population générale est l'alimentation .

IV.1.1. Viande et exposition alimentaire

Parmi l'ensemble des denrées alimentaires, les fruits et légumes, les boissons, les poissons carnivores surtout, et les crustacés sont les vecteurs contribuant le plus à l'exposition des populations en métaux lourds. Les viandes ne contribuent que très peu à l'exposition alimentaire en plomb, cadmium et mercure.

D'après l'étude de l'alimentation totale française réalisée par l'INRA parue en 2004, les viandes de boucherie (bovins, porcs, ovins, caprins et **volaille**) ne participent que pour 1,63 % à l'apport journalier total en cadmium, 0,97 % à l'apport journalier total en plomb, et 1,56 % à celui en mercure.

Les abats, reins et foie de ces animaux, sont toutefois une source d'exposition plus importante en métaux lourds que les viandes (voir tableau 5). Ceci vaut spécialement pour le cadmium, qui s'accumule dans le foie et les reins compte tenu d'une quasi-absence d'excrétion de l'organisme quand il a été absorbé par le tractus digestif. Le Règlement (CE) 1831/2003 fixe teneurs maximales dans les denrées alimentaires destinées à la consommation humaine. Pour les viandes de volailles, les LMR sont de 0,1 mg/kg et 0,05 mg/kg, respectivement pour le plomb et le cadmium. Pour le mercure, les LMR sont uniquement fixées dans les produits de la pêche, dans la mesure où ces produits constituent la principale source d'exposition alimentaire au mercure.

Tableau 5 : Exposition et apports moyens journaliers de la population française en métaux lourds via les viandes et abats

Aliments	Cadmium		Plomb		Mercure	
	Apport moyen journalier (µg)	% ^{***}	Apport moyen journalier (µg)	% ^{***}	Apport moyen journalier (µg)	% ^{***}
Viandes*	0,04	1,63	0,18	0,97	0,15	1,58
Abats**	0,11	4,04	0,12	0,64	0,04	0,53

(Source : INRA, *Etude de l'alimentation totale française, mai 2004*)

* bovins, porcs, ovins, caprins - ** bovins, équins, volaille - *** pourcentage sur l'ensemble des aliments étudié

IV.1.2. Résultats des plans de surveillances des métaux lourds dans la volaille.

Des études des plans de surveillances des métaux lourds dans les denrées alimentaires d'origines alimentaires réalisés en France montrent sur les prélèvements **volailles**, une grande variabilité interspécifique dans les concentrations en cadmium obtenues a été observée (les canards présentent les concentrations moyennes les plus élevées).

Les prélèvements de volailles s'effectuent pratiquement toujours en abattoirs sur des poulets de chair, des poulets de réforme, des dindes, ou d'autres volailles (maigres ou grasses).

Les valeurs moyennes en plomb sont plutôt homogènes entre espèces alors que pour le cadmium elles varient d'un facteur 7.

En 2000, les résultats obtenus dans la catégorie « autres volailles » amènent les auteurs à supposer que le canard concentre plus facilement le cadmium que les autres espèces.

En 2006, 4 prélèvements se sont révélés non-conformes, tous concernant le cadmium chez des dindes. Les concentrations moyennes calculées sur les échantillons prélevés sont toutes largement inférieures aux normes réglementaires.

Ceux-ci expliquent les teneurs en cadmium plus élevées dans les foies des poulets de réforme que dans ceux des poulets de chair par l'âge plus important des premiers. D'autre part, les auteurs des plans indiquent que les volailles élevées en plein air, qui picorent le sol, présentent des contaminations en métaux lourds plus importantes que celles élevées hors-sol.

***Situation en Algérie**

En Algérie, seuls les environnements industriels (aquatiques et atmosphériques), ont été jusqu'ici considérés. En revanche la contamination par des métaux lourds dans Les denrées alimentaires d'origines animales, n'a pas été suffisamment étudiée. Le peu de travaux réalisés dans la région

traitent uniquement des teneurs totales en ces métaux dans les produits de la pêche et les plantes destinées aux animaux domestiques (Kadem ,2005 ; Mehennaoui ,2009).

Une étude, réalisée dans le cadre des travaux d'étudiants et/ou d'enquêtes a permis de mettre en évidence une contamination dans la chair du poulet par le plomb a un taux de 109,82 µg/kg supérieur a la limite maximale résiduelle (LMR = 100 µg/kg) au niveau de la localité de Tizi-Ouzou. La contamination par le cadmium dans la chair et le foie est inferieur aux LMR ; par contre les teneurs enregistrées pour le mercure étés élevés dans la chair (99 µg/kg),le foie (116,71 µg/kg) et les reins (123 µg/kg) dans la localité d'Alger .(djelout B ;2007).

Le tableau 6 ci –dessous édite les résultats obtenus pour la contamination globale du poulet (toute matrices confondues) par les trois métaux au niveau des localités étudiées par Djélout B 2007.

Tableau 6: La contamination globale du poulet par trois métaux et par localité (µg/kg).

Métal \ Localité	Mercure	Plomb	Cadmium
Alger	112,51(n=19)	85,87(n=27)	11,76(n=30)
Tizi –Ouzou	36,00(n=30)	116,71(n=30)	9,68(n=30)
Béjaia	32,48(n=30)	117,91(n=30)	12,41(n=30)

-n effectif.

Les résultats obtenus révèlent une augmentation significative de la contamination en mercure (Hg) dans la localité d'Alger par rapport aux localités de Tizi-Ouzou et de Bejaia , par contre la contamination en plomb augment significativement dans les localités de Tizi-Ouzou et de Bejaia par rapport a la localité d'Alger .

On ce qui concerne la contamination par le cadmium ,elle apparait non significative dans les trois localités.

IV.2.Part de l'alimentation animale

Pour garantir la sante animale, la productivité agricole et aussi la sante humaine, les aliments pour animaux ne doivent pas contenir de métaux lourds en quantités indésirables. La Directive 2002/32/CE modifiée dite Directive « substances indésirables » fixe les TMR des métaux lourds dans les aliments pour animaux. Elle a été actualisée en 2005 par les Directives 2005/8/CE et 2005/87/CE. Les nouvelles TMR fixées par cette Directive font régulièrement l'objet d'arretes de transposition en droit français en venant compléter ou modifier les annexes

de l'arrête du 12 janvier 2001 fixant les teneurs maximales pour les substances et produits indésirables dans l'alimentation des animaux. Par exemple, un complément alimentaire pour la volaille doit contenir au maximum 5 mg/kg de plomb, 0,5 mg/kg de cadmium.

La surveillance de l'alimentation animale est importante pour prévenir la contamination des animaux destinés à la consommation humaine, même si souvent il n'apparaît pas possible de prédire d'une manière fiable le niveau de contamination en métaux lourds dans les produits des animaux à partir des teneurs mesurées ou estimées dans les aliments ingérés.

En effet dans les œufs par exemple, Fakayode et Olu-Owolabi, 2003 ont mis en évidence une forte corrélation positive entre les teneurs en métaux lourds dans la ration alimentaire des poules et les teneurs observées dans leurs œufs. Pour le méthylmercure, la dose transférée peut atteindre 50 % de la quantité total de métal ingérée .Le plomb et le cadmium qui contaminent les oeufs se concentrent principalement dans la coquille, puis dans le jaune d'oeuf . Pour les deux métaux, l'albumen reste lui presque indemne de contamination.

En 2006, une analyse officielle réalisée sur un additif alimentaire (sulfate de zinc importé de Chine) a révélé des niveaux de contamination plus de trois cent fois supérieur à la norme.

À la suite de cette constatation, les animaux qui étaient susceptibles d'avoir consommé cet additif ont été identifiés et leurs abats ont été saisis.

Par ailleurs; les donnés d'Alexieva et al (2007), en Bulgarie, ont montrés des taux élevés en cadmium (20,34%) et en plomb (33,9%) par rapport à la réglementation européenne, dans l'aliment pour volaille et porc

En outre des teneurs en cadmium et en plomb rapportés par Mahesar et al (2010); variant de 15,6 -33,6 mg/kg et 23,2-32,6mg/kg respectivement; dans l'aliment de volaille, ces concentrations dépassent la LMR , qui pourraient être néfastes pour la volaille et par conséquent sur la santé humaine .

CONCLUSIONS ET PRESPECTIVES

Conclusion et perspectives

Ce mémoire de fin d'étude a été consacré essentiellement à évaluer les risques liés aux métaux lourds dans les denrées alimentaires d'origines animales (cas particulier de la volaille), en effet ces métaux ont fait l'objet depuis quelques années de travaux scientifiques importants en vue de préciser les effets néfastes à long terme sur la santé du consommateur.

Les sources potentielles de métaux lourds sont multiples, ce qui complique d'autant l'analyse de ce risque. Toutefois la voie alimentaire représente la voie d'exposition prépondérante, notamment en raison des phénomènes de bioconcentration et de bioaccumulation qui surviennent le long des chaînes trophiques

En effet, mieux connaître les mécanismes d'exposition à ces métaux contribuerait à l'évaluation du danger pour l'homme et permettrait d'initier une réflexion quant aux moyens de lutte et de prévention.

Le risque majeur encouru à travers l'exposition à ces différents métaux est la toxicité aiguë et dans une moindre mesure la toxicité à long terme. Le mal est silencieux car l'indisposition ne survient qu'au terme d'importantes périodes d'absorption de petites doses de ces métaux lourds.

Comme perspectives, nous pensons que ce travail peut être amélioré en tenant compte des points suivants :

- Mettre en place des plans de contrôle pour but d'exercer une pression de contrôle permettant d'améliorer les pratiques et d'assurer une haute qualité aux denrées alimentaires.
- Mettre en œuvre diverses mesures d'évaluation et de gestion du risque afin de préserver la santé publique.
- Une analyse complémentaire plus étendue, visant à rechercher les métaux lourds dans d'autres matrices (le poulet de chair : abats, chair, sang) ; matières premières, les additifs, aliments pour animaux (différents stades de développement), les œufs, la litière,), pourrait nous permettre d'être davantage situé sur cet éventuel danger.

BIBLIOGRAPHIE

A

Afsset., 2006. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. La pollution atmosphérique urbaine .Fiche toxicologique. Lien internet (consulté le 01-08-12) : <http://www.afsset.fr>

Alexieva D., ChobanovaS ., IlchevA ., 2010. Study On The Level Of Heavy Metal Contamination In Feed Materials And Compound Feed For Pigs And Poultry In Bulgaria. Trakia Journal of Sciences, Vol. 5, No. 2, pp 61-66.

Altmann L, Bottger A, Wiegand H.,1997. Neurophysiological and psychophysical measurements reveal effects of acute low-level organic solvent exposure in humans. International Archives of Occupational and Environmental Health .**62**: 493-9.

Anonyme. , 2013. Maladie de *itai-itai*. Lien internet (consulté le 28-02-13) : <http://www.ulg.ac.be/ocean/bio/biocand/telechargement/ecotoxpartim.1ppt> .

Anonyme., 2013.Plomb.Lien internet (consulté le 28-02-13): <http://www.wikipédia.org/wiki/plomb.fr>.

Anonyme., 2013 .Cadmium.Lien internet (consulté le 28-02-13) : <http://www.wikipédia.org/wiki/plomb.fr>.

ATSDR ,1999.«Toxicological Profiles for cadmium». Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA: U.S department of Health and Human Services, Public Health Services.

Lien internet (consulté le 22-09-12) :<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp5.html>.

ATSDR , 2005 .«Toxicological Profiles for lead». Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA: U.S department of Health and Human Services, Public Health Services.

Lien internet (consulté le 25-01-13) :<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp46.html>.

B

Baize D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols, Paris, INRA, 408p.

Berny P., 2006. Bioaccumulation dans les chaînes alimentaires .Pharmacie-Toxicologie. Ecole vétérinaire de Lyon.

Blliefer C., Perraud R., 2001. Chimie de l'environnement : air, sol, eau, déchets. Ed de Boeck. 447p.

Bui X T., 2007.Utilisation de matrices agro-alimentaires comme indicateurs de pollutions environnementales, exemple le lait .Thèse de doctorat. Paris.162p.

Burger J., Gochfeld M .,1995.Heavy metal and selenium concentration in eggs of herring gulls (*larus argentatus*),Temporal différences form 1989-1994.Archives of Environmental contamination and toxicology 29,192-197.

C

Cang L.,Wang Y-J.,Zhou D-M., Dong Y-H.,2004.Heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province ,China.Journal of Environmental Sciences .Vol .16.NO.3.pp.371-374.

Casas S., 2005.Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd, Pb, Cu et Zn) chez la moule, *mytilus galloprovincialis*, en milieu méditerranéen,Thèse de doctorat d'Océanologie biologique, Environnement marin, Université du Sud, Toulon-Var,314 p.

Chanel O., Dolfus C., Hartemann Ph., Huel G., Larroque B., Lison D., Pinon-Lataillade G., Premont J., Zimiron D ., 1999. Plomb dans l'environnement.Quels risque pour la santé ?. Synthèse et Recommandations.

Choe SY. , Kim SJ., Kim HG., Lee JH., Choi Y., Kim Y., 2003 .Evaluation of estrogénicity of major métaux . Sci-Total Environ, 312, 15-12.

Cossa D., Bourget E., Pouliot D., Piuze J., Chanut J.P., 1980. "Geographical and seasonal variations in the relation ship between trace metal content and body weight in *Mytilus edulis*." Mar.Biol 58: 7-14.

D

Danel V ., 1997. Intoxication par le plomb, physiologie, épidémiologie, diagnostic. Rev prat.

Darrell W. Trampel, Paula M. Imerman, Thomas L. Carson, Julie A. Kinker, Steve M.

Demirbas A.,1999. Proximate and heavy metal composition in chicken meat and tissues. Food and chemical toxicology .67,27-31.

Di Benedetto M., Anfossi S., Billiard E.,Bonnet M.,Henriot F.,Kraemer F., Lechenne L., Le Herissier M., Lorin S ,1997,Méthodes spectrométrique d'analyse et de caractérisation ,Dossier SAM : Les métaux lourds ,Génie des procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne,1-49.

Doelsch E.,2004 .Elément trace métallique. Inventaire de la réunion (chambre d'agriculture). France.

Djeloute B.2007. Evaluation des métaux lourds dans le poulet de chair .Thèse de magistère.

F

Fakayode SO.,Olu-Owolbi IB., 2003.Teneur en métal et contenu estimé de l'ingestion humaine quotidienne à partir des œufs de poulet à Ibadan ,Nigeria.Arch.Environ.Health58 ,245-251.

G

Galez P , 2011.Absorption atomique et Emission de flamme. Technique spectroscopiques d'analyse. Mesures Physique Annecy-MPh2 SE3 ME3.17p.

I

INERIS , 2003. « Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Plomb et ses dérivés ». Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques. Lien internet (consulté le 22-09-12) : <http://www.ineris.fr>.

INERIS , 2005.« Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Cadmium et ses dérivés ». Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques. Lien internet (consulté le 22-09-12) : <http://www.ineris.fr>.

INSERM., 1997. Site de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale. Plomb dans l'environnement, quels risques pour la santé ?. Lien internet (consulté le 02-03-13) : <http://www.inserm.fr>.

INERIS, 2005. « Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Cadmium et ses dérivés ». Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques. Lien internet (consulté le 01-09-12) : <http://www.ineris.fr>

INRS ., 1997. Institut national de recherche et de sécurité. cadmium et composés minéraux. . Fiche toxicologique n°60 : Site de l'inrs. Lien internet (consulté le 01-09-12) : <http://www.inrs.fr>

ITAVI. , 2004. Institut Technique de L'aviculture. Eau de boisson en élevage avicole. Paris.

K

Kadem D-E-D., 2005. Évaluation Et Comportement Des Métaux Lourds(Cd – Cr – Cu – Ni – Pb – Zn Et Mn) Dans Les Sols À Vocation Agricole Et À Végétation Naturelle Soumis À Une Pollution Atmosphérique. (El-Hadjar – Annaba – Est Algérien). Influence De La Végétation Sur La Dynamique de ces Métaux. Thèse de doctorat. Université Mentouri De Constantine, Algerie.76p.

Kaimoussi A., Mouzdahir A., Saih A., 2005. Variations saisonnières des concentrations en métaux (Cd, Cu, Fe, Mn et Zn) chez l'algue *Fucus spiralis* du littoral de la ville d'El Jadida (Maroc). *Water Qual. Res. J. Canada*, 2005 • Volume 40, No. 1, 102–110.

KaoT ., El Mejahed K. , Bouzidi A.,2007. Evaluation de la pollution métallique dans les sols agricoles irrigués par les eaux usées de la ville de Settat (Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Vie*, n°29, 89-92.

M

Mehennaoui S.,Afri-Mehennaoui F-Z., 2004. Comparaison de trois techniques d'extractions pour la détermination des éléments traces métalliques dans les sédiments de l'oued Rhumel et son affluent l'oued Boumerzoug en zone urbaine (Constantine). *Sciences & Technologie C-N°21*, pp. 20-38.

Mench M, Baize D., 2004. Contamination des sols et de nos aliments d'origine végétale par les éléments en traces. Courrier de l'environnement de l'INRA n°52.

Mills NL., Donaldson K., Hadoke PW., Boon NA., Macnee W., Cassee FR., Sandsti T., Blomberg A., Newby DE., 2009. Averse cardiovasculaire effects of air pollution, Nat clin Part cardiovasculaire Med6(1)36-44.

Miquel G ., 2001. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé In : Rapport d'information n° 261 (2000-2001) de M. Gérard MIQUEL et plusieurs de ses collègues, fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques, déposé le 5 avril 2001.

N

Nakhalé K F. ,2003.Le mercure, le cadmium et le plomb dans les eaux littorales libanaises, apport et suivi moyen de bio indicateurs quantitatif (éponges, bivalves, gastéropodes).Thèse de doctorat. Université Denis DIDEROT. Paris.

Neff JM., 2002.Bioaccumulation in Marine Organisms: Effect of contaminants from oil well produced water, Elsevier Science Publishers , Amsterdam.

P

Peltier A., Boulet A., 1994.Laboratoires et organismes agréés à l'évaluation de l'exposition au plomb. Résultats des essais de qualité. Cahiers de notes documentaires –Hygiène et sécurité du travail, 154pp, 43-49.

Perrin J-B., 2007. Les plans de surveillance et de contrôle dans l'analyse du risque alimentaire aux métaux lourds en France. Thèse pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire .Ecole National Vétérinaire de Lyon.147p.

Picot A., 2003 , Le mercure, le plomb et le cadmium trois : métaux traces toxiques. Conférence

ADNO 29 novembre 2003. Paris.

Pitot, C.H., Dragan, P.Y., 1996. Chemical carcinogenesis. In: Casarett and Doull's Plomb dans l'environnement : Quels risques pour la santé ?. Synthèse et recommandations.

Pokras M. A., Kneeland M. R., 2009. Understanding lead uptake and effects across species lines: A conservation medicine approach. In R. T. Watson, M. Fuller, M. Pokras, and W. G. Hunt (Eds.). Ingestion of Lead from Spent Ammunition: Implications for Wildlife and Humans. The Peregrine Fund, Boise, Idaho, USA. DOI 10.4080/ilsa.2009.0101.

R

Rabiowitz .,1976. Kinetic analysis of lead metabolism in healthy humans.J Clin Invest.58(2),260-270.

Richard –Mazet S., 2008. Etude écotoxicologique et environnementale de la rivière Drôme : application à la survie de la loutre. Thèse de doctorat. Université de Joseph Fourier-GrenobleI-France .228p.

Robert, P. et Jean –Pierre, S., 2007. Chimie industrielle, 2ème édition, Masson, pp 1024 ,1046.

Rouessac F Rouessac A., Cruché D., 2004. Analyse Chimique, Méthodes et techniques instrumentales modernes, 6ème édition. Dunod , Paris .

S

Sardar W-H., Imran H.,Syed Mubbasher S.,2003.Effect of environmental pollution on quality of meat in district bagh ,Azad Kashmir. Pakistan Journal of Nutrition 2(2) ,98-101.

Satarus S., Moore MR ., 2004. Adverse Health Effects of Chronic Exposure to Low-Level Cadmium in Foodstuffs and Cigarette Smoke. Environ Health Perspect. 1; 112(10): 1099-1103. published online before print March 25, 2004.

Sikiric M ., Brajenovic N ., Pavlovic I ., Havranek JL ., Ptavljanic N.,2003. Détermination of métaux in cow's milk by flame atomic absorption spectrometry .Czech J.Anim.Sci 48(11) ,481-486.

V

Vandegans J., Kersabiec A-M ., Hoeing M ., 1997. Spectrométrie d'absorption atomique .Technique de l'ingénieur, traité analyse et caractérisation.Doc.PE2862.27p.

Vial J., Le Mapihan L., Jardy A., 2002. Qualification, validation et test de conformité: outils indispensables pour la sécurité des analyses.,Bioforum International ,2ème Edition Française.

Vial J., 2006. Définition de la validation d'une méthode et outils associés .Journé de formation Scientifique en Spectrométrie Atomique .Laboratoire Environnement et Chimie Analytique de l'ESPCI.

Viala A ., 2007.Toxicologie . 2 ème édition, TEC et DOC Lavoisier.