



HAL
open science

CONTRIBUTION A L'ÉVALUATION DE LA CONTAMINATION PAR LES MÉTAUX LOURDS, DE TROIS ESPÈCES DE POISSONS, DES SÉDIMENTS ET DES EAUX DU LAC TCHAD.

Barnabas Kayalto, Carl M.F. Mbofung

► **To cite this version:**

Barnabas Kayalto, Carl M.F. Mbofung. CONTRIBUTION A L'ÉVALUATION DE LA CONTAMINATION PAR LES MÉTAUX LOURDS, DE TROIS ESPÈCES DE POISSONS, DES SÉDIMENTS ET DES EAUX DU LAC TCHAD.. Alimentation et Nutrition. 2009. hal-00825482

HAL Id: hal-00825482

<https://auf.hal.science/hal-00825482>

Submitted on 23 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail - Patrie

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR

UNIVERSITE DE NGAOUNDERE



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace - Work - Fatherland

MINISTRY OF HIGHER
EDUCATION

THE UNIVERSITY OF NGAOUNDERE



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRO-INDUSTRIELLES

NATIONAL ADVANCED SCHOOL OF AGRO-INDUSTRIAL SCIENCES

B.P. 455 NGAOUNDERE, CAMEROUN

DÉPARTEMENT DES SCIENCES ALIMENTAIRES ET NUTRITION (SAN)

**CONTRIBUTION A L'ÉVALUATION DE LA CONTAMINATION PAR
LES MÉTAUX LOURDS, DE TROIS ESPECES DE POISSONS, DES
SEDIMENTS ET DES EAUX DU LAC TCHAD.**

Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA)
en Sciences Alimentaires/Nutrition

Par

KAYALTO Barnabas

Ingénieur Agrochimiste

Matricule 06D108EN

Sous la direction de :

et

TCHATCHUENG Jean Bosco

Maître de Conférences

ENSAI

Université de Ngaoundéré

MBOFUNG Carl Moses F.

Professeur

ENSAI

Université de Ngaoundéré

Année Académique : 2008/2009

SOMMAIRE

DEDICACES	iv
REMERCIEMENTS.....	V
ABREVIATIONS	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES ANNEXES.....	X
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	XI
RESUME.....	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE	3
A- Généralités sur la pollution.....	3
1. La pollution.....	3
2. Les sources de pollution.....	4
2.1. La pollution d'origine humaine.....	4
2.2. La pollution d'origine non humaine.....	5
3. Les types de polluants.....	5
3.1. Micropolluants organiques non pesticides.....	5
3.2. Pesticides et Biocides.....	5
3.3. Micropolluants minéraux.....	5
B- La pollution par les métaux lourds	5
1- Définition des métaux lourds.....	5
2- Caractéristiques de quelques métaux lourds.....	7
3- Les sources de contamination.....	7
3-1. Les sources naturelles	7
4- La bioaccumulation des métaux lourds.....	8
4-1. La bioaccumulation par l'individu : la bioconcentration	8
4-2. La bioaccumulation entre individus : la bioamplification.....	9
C- Impacts des métaux lourds sur la santé.....	10
1- La toxicité du mercure	11
1-1. Les sources de mercure	11
1-2. L'absorption, la répartition et l'excrétion du mercure.....	12
2- La toxicité du plomb.....	13
2.1 Les sources de contamination au plomb.....	13
2.2 L'absorption du plomb.....	13
2.3 La cinétique du plomb	13

2.4 Les sites d'action du plomb	14
2.5 Elimination du plomb	14
2.6 Intoxications et effets du plomb.....	14
3- La toxicité du cadmium	16
4- Les effets du chrome (Cr) sur la santé.	18
4-1. Les sources du chrome.....	18
4-2. Les besoins essentiels de l'homme en chrome	18
4-3. L'absorption, la distribution et l'excrétion du chrome.....	19
4-4. Les effets toxiques du chrome.	20
4-5. Influence des techniques de traitement des eaux sur la toxicité du chrome.	21
D- Généralités sur le Tchad et le Lac Tchad.....	22
1-Généralités sur le Tchad.....	22
1-1. Géographie physique	23
1.2. Population et développement humain.....	23
1.3. L'alimentation.....	24
1-4. La pêche.....	24
1-5. L'eau et la santé	24
1-6. L'Education.	25
2. Le Tchad et son hydrologie.....	26
3. Les problèmes environnementaux au Tchad.....	28
E- Le choix des poissons et leur description.....	30
1- Les espèces de poissons capturées au Lac Tchad	30
1-1-L'importance de la pêche au Lac Tchad	30
1-2-Les espèces de poissons capturées au lac Tchad	32
2. Description des espèces choisies pour notre étude.....	32
2-1. Le capitaine (<i>Lates niloticus</i> L.).....	32
2-2. Le machoiron (<i>Arius latiscutatus</i>).....	33
2-3. Les carpes (<i>Tilapia nilotica</i>).	33
3. La valeur nutritive du poisson.	34
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES	36
II-1. L'échantillonnage	36
II-1-a. Des poissons	36
II-1-b. De l'eau.....	36
II-1-c. Des sédiments.....	36
II-2. La préparation des échantillons	37
II-2-1. Préparation des échantillons des poissons.	37
II-2-1-a. Détermination de la matière sèche (MS) des poissons.....	37
II-2-1-b. Détermination de la teneur en cendres totales pour 100 g de matière sèche.	38
II-2-1-c. Détermination de la teneur en cendres pour 100 g de matière fraîche.	38
II-2-1-d. La solubilisation des cendres et extraction des minéraux.....	39
II-2-2. Préparation des sédiments.	39
II-2-3. La préparation des échantillons d'eau.	39
II-3. Dosage au spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme (FAAS).....	40
II-3-1. Principe de la spectrophotométrie d'absorption atomique (AAS).....	40
II-3-2. Préparation des gammes étalons et dosage des échantillons.....	41
II-3-2-a. Préparation de la solution étalon du cadmium et dosage.....	41
II-3-2-b. Préparation de la solution étalon du plomb (Pb) et dosage.....	41
II-3-2-c. Préparation de la solution étalon du Chrome (Cr) et dosage.	41
II-3-3. Lecture au spectrophotomètre d'absorption atomique de flamme	42
II-3-3-a. Préparation de la machine	42
II-3-3-b. Lecture des résultats	42
II-4. Analyses statistiques des résultats.....	43

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	44
III-1. Concentration des éléments traces métalliques dans les eaux et les sédiments du lac Tchad.....	44
III-2. Bioaccumulation des métaux lourds dans les différentes parties des.....	48
III-3. Comparaison entre espèces de l'accumulation du chrome dans les organes.....	60
CONCLUSION.....	63
PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS :	63
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	65
ANNEXES	A

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- Ma Chère Mère Goida Ruth Merso, diaconesse, qui ne se lasse nuit et jour, de prier pour moi ; afin que Dieu Omniscient et Omnipotent, me préserve de tout mal et guide mes pas et,
- Mon épouse Christine Ali Odah, à nos enfants Charles, Raïssa, Mbaye-Mbaye, Olga qui ont été avec moi, à travers monts et vallées durant deux ans.

REMERCIEMENTS

Aucun travail ne s'accomplit dans la solitude. En début de ce travail, nous voulons remercier tous ceux qui ont aidé, concouru à sa réalisation.

Nous remercions :

Professeur MBOFUNG, Directeur de l'ENSAI, mon superviseur, qui malgré ses lourdes responsabilités, m'a guidé de bout en bout, encouragé, conseillé, facilité mes multiples déplacements et m'a enseigné le plus important : la rigueur du travail intellectuel.

Professeur TCHATCHUENG pour son encadrement et ses remarques judicieuses, sa disponibilité, malgré ses multiples responsabilités.

Docteur Bitjoka, Chef de la Division des Affaires Académiques, de la Coopération, de la Recherche et de la Scolarité (DAACRS), pour la coordination générale de nos travaux et sa disponibilité.

Professeur NDJOUENKEU, chef de Département, pour l'organisation générale de nos enseignements et ses conseils.

Docteur TIEUDJO, pour sa disponibilité permanente et ses conseils dans les traitements statistiques de mes résultats.

Tous mes enseignants, les Professeurs Tenin DZUDIE, Clergé TCHIEGANG, et Martin NGASSOUM ; les Docteurs EJOH, FOMBANG, TATSADJEU, BAWALA, NSOH pour leurs savoirs partagés avec nous et leur encadrement.

Les membres de jury de ce mémoire, pour vos suggestions qui contribueront à l'amélioration de la qualité scientifique de ce travail ;

J'exprime ma profonde reconnaissance et mes remerciements au Directeur Général de l'Ecole Supérieure des Sciences Exactes et Appliquées de Bongor (ESSEAB), Monsieur Ayambi GOUTIMA ; au Secrétaire Général, Monsieur Dotarde ALLAL ; à l'agent comptable, Monsieur GRANGUYO Garina Marcel; qui m'ont soutenu, encouragé et risqué leur vie plusieurs fois dans la circulation difficile entre Nguéli et Kousséri afin de m'apporter le soutien financier, sans oublier tous mes collègues et collaborateurs de la dite Ecole.

Je remercie Pr. ANACKLE, Directeur du LRVZ de N'Djaména, Dr. Salé HAGAM, coordonnateur de l'antenne chaire UNESCO des sciences de l'éducation pour l'Afrique centrale et Professeur Balaam FACHO; d'avoir accepté me recommander pour cette étude ;

Je remercie Docteur Ali AHMED, Directeur de l'IUT de l'Université de Ngaoundéré, pour son accord, sa disponibilité et son accueil dans son laboratoire de Génie Chimique pour mes analyses. J'adresse également ces remerciements et reconnaissance à Mr. SAIDOU qui, malgré ses travaux de thèse et d'enseignement ; a passé des journées entières avec moi, dans ce laboratoire pour effectuer mes analyses.

J'adresse mes remerciements au Docteur MAHMOUD ; D.G. de l'Institut Universitaire des Sciences et Techniques d'Abéché (IUSTA), au S.G. DABOULAYE et à leurs collaborateurs Dr. ABDALSALAM, les techniciens Youssouf GONI, MBODJI, WELBA, Al Hadj et KADI, pour leur accueil et leur collaboration lors de mon séjour dans leur laboratoire des Sciences Biomédicales (SBM) ;

J'adresse mes remerciements à tous mes camarades de promotion, Cyrille, Roger, Yadjji, Barbi Matthieu, Yves, Awono, KEMGANG, Babba, KENFACK Sylvie notre déléguée, Fodeuba, Josiane, Nadège, Romelle, Bebbe, Mme AGUME, NDURYANG, FOGANG Bienvenu, Solange, Bouba pour leur collaboration, conseils et soutien.

Je remercie également mes aînés, les Docteurs NJINTANG, Aboubakar, Abdou Bouba Armand, KAPSO Giscard, les doctorants Biyanzi Pierre, Augustin, Julie, Koffa, Gaston, Charles; qui m'ont encouragé, conseillé et guidé dans mes travaux et ont accepté de relire tout ou partie du tout premier texte de ce travail et m'ont fait part de leurs réactions et remarques et aussi m'ont aidé à rassembler la documentation nécessaire

Je remercie particulièrement Alphée GOIMBI, qui a abandonné durant quelques jours, ses enseignements et sa famille, pour me conduire sur les pistes difficiles vers le lac Tchad ;

Je remercie mes oncles, André, Barthélemy, Moussa, Séraphin ZAM, mon grand père AGARA Philippe, et mes frères et sœurs : Backa, Salomon, Japhet, Nathan, Kadadi, Philémon, Séphora, Léa, Eunice, Déborah, Dénéjom, Jaëlle ; pour leur soutien moral.

Je ne saurais oublier mes bailleurs, Kariwa et Docteur Libouga, pour la chaleur de leurs maisons et mes voisins pour leurs encouragements, plus particulièrement, le commissaire principal, NGAHANE Roger.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans y associer Cadmiel Djangrang et Lamy qui m'ont accueilli à Dang, Me Béchir Madet pour son soutien moral et financier, mon cousin Emmanuel qui téléphonait toujours pour savoir où j'étais dans mes déplacements et comment je me portais, Limane Worgué pour son soutien logistique, Daouda Addibang et sa famille, mes cousins, cousines et compatriotes de Dang ; pour leur soutien multiformes.

Que tous, frères, sœurs, cousins, cousines, amis, familles ; non cités nommément ici, qui, moralement, matériellement, en prière m'ont soutenu trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude et reconnaissance.

ABREVIATIONS

AFNOR : Association Française de Normalisation
AOAC: Association of Official Analytical Chemist
BDL : Brasseries du Logone ;
BGT : Boissons Gazeuses du Tchad ;
CBP : Cancer Broncho-pulmonaire ;
CCNUCC : Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ;
CEMAC : Communauté Economique et Monétaire d’Afrique Centrale
CFC : Carbofluorocarbones
CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer
CST : Compagnie Sucrière du Tchad ;
ECOSIT : Enquête sur la Consommation et le Secteur Informel au Tchad
EIMT : Enquête sur les indicateurs multiples au Tchad
ENASS : Ecole Nationale des Agents Sociaux et de la Santé
ENSAI : Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles
FAAS: Flam Absorption Atomic Spectrophotometer
HAP: Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HCH: Hexachlorocyclohexane
IDH : Indice de Développement Humain
INSEED : Institut National des Statistiques, des Etudes Economiques et Démographiques ;
IUPAC: Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (sigle anglais)
JECFA: Joint FAO/WHO, Expert Committee on Food Additives;
LRVZ : Laboratoire de Recherche Vétérinaire et Zootechnique ;
MEE : Ministère de l’Environnement et de l’eau ;
ODM : Objectifs du Millénaire ;
OGM : Organismes Génétiquement Modifiés ;
PCB : Polychlorobiphényles ;
P.F.S.C : Point Focal Substances Chimiques ;
POPs : Produits Organiques Persistants ;
RGPHT : Recensement Général de la Population et de l’Habitat du Tchad ;
SAN : Sciences Alimentaires et Nutrition ;
SNRP: Stratégie Nationale de Réduction de la Pauvreté;
VME : valeur limite moyenne d’exposition.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les sites d'échantillonnage de l'eau et des sédiments.....	38
Figure 2. Schéma de principe de la spectrophotométrie d'absorption atomique.....	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quelques caractéristiques physiques des métaux recherchés.....	7
Tableau 2 : Les techniques de traitement des eaux contenant les métaux lourds.....	22
Tableau 3 : Cinq premiers motifs de consultation dans les centres de santé en 2003, au Tchad.....	26
Tableau 4 : Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement.....	30
Tableau 5 : La production de poissons dans les eaux intérieures du Tchad, de 1965 à 1993 (en tonnes.....	32
Tableau 6 : La production de poissons au Lac Tchad, de 1969 à 1981 (en tonnes).....	32
Tableau 7 : Principaux constituants du filet de poisson, en %	36
Tableau 8 : Teneur en métaux lourds des eaux, par site d'échantillonnage (moyenne \pm écart- type).....	45
Tableau 9 : Teneur en métaux lourds des sédiments, par site d'échantillonnage (moyenne \pm écart-type).....	46
Tableau 10 : Taille et poids des poissons.....	49
Tableau 11 : La teneur en eau et en matière sèche (MS) des organes des poissons du Lac Tchad.....	50
Tableau 12: Teneur en cendres totales des organes des poissons du Lac Tchad.....	51
Tableau 13 : Concentration ($\mu\text{g/g}$ de MS) en métaux lourds des organes des carpes du Lac Tchad.....	53
Tableau 14 : Concentration ($\mu\text{g/g}$ de MS) en métaux lourds des organes des capitaines du Lac Tchad.....	54
Tableau 15 : Concentration ($\mu\text{g/g}$ de MS) en métaux lourds des organes des machoirons du Lac Tchad.....	54
Tableau 16 : Quantité, en mg, de métal lourd par poisson.....	55
Tableau 17 : Normes des micropolluants (U.E., USA, JECFA FAO/OMS).....	56
Tableau 18 : concentrations des métaux lourds ($\mu\text{g.g}^{-1}$ de M.S.) dans les poissons des eaux de quelques pays	62

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Identification des sources de pollution au Tchad.....	a
Annexe 2: Aperçu des secteurs industriels et agricoles du Tchad.....	a
Annexe 3: Quantités des produits chimiques utilisés au Tchad, par secteur d'activité.....	b
Annexe 4 : Les courbes d'étalonnage du Cd, Cr et du Pb.....	d
Annexe 5 : Ensemble de filtration sur membrane de cellulose utilisé et photo membrane	e
Annexe 6 : Test de Duncan entre les différents sites étudiés.....	e
Annexe 7 : Corrélation entre la concentration du chrome dans les différents organes et les les poids des carpes.....	f
Annexe 8 : Corrélation entre la concentration du chrome dans les différents organes et les poids des capitaines.....	g
Annexe 9: Corrélation entre la concentration du chrome dans les différents organes et les poids des Machoïrons.....	h
Annexe 10 : Corrélation entre le chrome dans les différents organes et les poids des carpes, des capitaines et des machoïrons.....	i
Annexe 11 : Grille de qualité de Mersch pour interpréter les concentrations métalliques (en µg/g) observées chez <i>Dreissena polymorpha</i>	j

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photographie 1 : Le capitaine (<i>Lates niloticus</i>).....	34
Photographie 2 : Le machoiron (<i>Arius latiscutatus</i>).....	34
Photographie 3 : Les carpes (<i>Tilapia nilotica</i>).....	35
Photographie 4 : Spectrophotomètre d'absorption atomique de flamme... ..	41

RESUME

Le fleuve Chari, qui se jette dans le lac Tchad, constitue le déversoir de tous les effluents urbains et industriels du Tchad. Les fleuves Logone et Chari, le lac Tchad ; sont exposés à toutes formes de pollution qui peuvent faire courir de risques de santé réels à l'homme. Le but de ce travail était d'identifier les métaux lourds présents dans les sédiments et l'eau du lac Tchad, d'évaluer leur bioaccumulation dans les poissons

Trois espèces de poissons, d'âges différents, à savoir : Les carpes (*Tilapia nilotica*), les capitaines (*Lates niloticus*) et les machoirons (*Arius latiscutatus*) ont été achetées au bord du lac Tchad, transportées sous glace. Le Cd, le Pb, et le Cr ont été dosés dans la tête entière, le foie, la chair et les os des poissons, dans les sédiments et dans l'eau au spectrophotomètre d'absorption atomique de flamme. Le Cd et le Pb n'étaient pas détectés dans les eaux et les sédiments, mais en comparant nos résultats obtenus dans la chair des poissons, à la grille de qualité de Mersch (1993) permettant d'évaluer le niveau de pollution, la pollution des eaux du Lac Tchad va d'une situation intermédiaire (Cd) à une pollution importante (Cr), en passant par une pollution certaine (Pb). Les sédiments (de 9,09 à 15,15 µg/g) étaient plus contaminés que les eaux (2,02 à 2,32 mg/L) ; valeurs toutes au-delà des normes existantes (UE, USA et JECFA FAO/OMS). Des teneurs hors normes précitées du Cd ont été retrouvées uniquement dans les carpes, tandis que des teneurs hors normes du Cr ont été retrouvées dans tous les poissons, sédiments et dans l'eau. Le plomb a été détecté, à une teneur hors norme, dans un seul organe, la tête de la petite carpe de notre étude, à une concentration moyenne de 5,15 µg/g de matière sèche (MS). Le cadmium, a été retrouvé, à la concentration moyenne de 2,18 µg/g de MS, dans la chair de la petite carpe, qui pesait 378g. De tous les organes, la plus haute teneur en chrome (353,02 µg/g), a été trouvée dans les os du grand capitaine, de poids 1,714 kg ; et la plus faible (5,57 µg/g) dans le foie de la carpe moyenne, de poids 682 g. En ce qui concerne la chair, la plus grande concentration du chrome (51,93 µg/g de MS) se trouvait dans la chair de la grande carpe, qui pesait 1,154 kg. La plus petite concentration (26,56 µg/g) du chrome a été relevée dans la chair de la petite carpe.

L'analyse des variances inter espèces, au seuil de 95 %, a montré qu'il y avait une corrélation positive ($r = 0,74$) et très significative ($p = 0,02$) entre la chair et les os des différentes espèces. Cela signifie que, lorsque le chrome s'accumule dans la chair, sa concentration augmente aussi dans les os.

Mots-clés : Age, bioaccumulation, fleuve chari, lac Tchad, Métaux lourds, poissons, pollution.

ABSTRACT

The river Chari, which empties into the Lake Chad, constitutes the spillway of all urban and industrial sewages of the city of N'djamena. This river as well as the Logone, both are exposed to all types of pollution whose consequences can be dramatic for human. The aim of this work was to determine the presence of some heavy metals in the water and sediments of the Lake Chad as well as in some sample of fish from the lake. Sediments and water as well as samples of three species of fishes, of different sizes (age): *Tilapia nilotica*, *Lates niloticus* and *Arius laticutatus* from the lake were analyzed for the levels of Cd, Pb, and Cr in their head, liver, flesh and bones, in sediments and water using flame atomic absorption spectrophotometer. Cadmium (Cd) and lead (Pb) were not detected in the water and the sediments. But comparing the obtained results in the fish flesh with the quality grill of Mersch (1993), the pollution of the water of Lake Tchad goes from an intermediate situation (Cd) to an important pollution (Cr), leads through certain pollution (Pb). The sediments (from 9.09 to 15.15 $\mu\text{g/g}$) were most contaminated than water (2.02 to 2.32 mg/L). These values are all beyond the exist norms (UE, USA and JECFA (FAO/OMS)). Abnormal levels of Cd were found only in Tilapia. With levels as high as 2.18 $\mu\text{g/g}$ dry weight in the flesh of the small carp, weighting 378 g. Cr concentrations were abnormally high in the organs of all fishes, sediments and water. The highest content of chromium was found in the bones of the big captain weighting 1.714 kg; and the lowest in the liver of the middle carp weighting 0.628 kg. With regards to the flesh content of the minerals, the highest concentration of chromium (51.93 $\mu\text{g/g}$ dry weight) was found in big carp weighting 1.154 g; this concentration while the smallest concentration (26.56 $\mu\text{g/g}$ dry weight) was found in the flesh of small carp however no significant variation was observed in the distribution of chromium in the organs of the fishes analyzed. However the overall result indicate a positive correlation ($r = 0.74$; $p < 0.02$) in the accumulation pattern of chromium in the bones and in the flesh.

Key words: Age, bioaccumulation, fishes, Heavy metals, Lake Chad, pollution, river Char

INTRODUCTION

Des centaines de polluants sont déversés chaque jour dans l'environnement. Parmi eux, les métaux lourds sont considérés comme de polluants graves de l'environnement aquatique à cause de leur rémanence et leur tendance à la bioaccumulation dans les organismes aquatiques (Harte *et al.*, 1991 ; Schuurmann et Markert, 1998). Plusieurs métaux lourds se retrouvent dans le milieu aquatique, par action de l'homme, par transport atmosphérique et à la suite d'érosion due à la pluie (Veena *et al.*, 1997). Ainsi donc, les animaux aquatiques peuvent se retrouver exposés à des concentrations élevées des métaux lourds (Kalay et Canh, 2000). Les métaux lourds peuvent ainsi affecter les organismes directement en s'accumulant dans leurs corps ou, indirectement par transfert par le biais de la chaîne alimentaire. La contamination des écosystèmes aquatiques par les métaux lourds peut être confirmée dans l'eau, les sédiments et les organismes (Forstner et Wittman, 1983). L'accumulation des métaux lourds dans ces compartiments peut résulter à la suite de sérieux changements écologiques. L'une des causes sérieuses de leur persistance est la bioamplification de ces métaux dans la chaîne alimentaire (Unlu et Gumgum, 1993). Les métaux qui sont transférés à travers le milieu aquatique aux poissons, aux hommes et autres animaux piscivores, peuvent avoir des impacts sur l'environnement et la santé humaine (Chen *et al.*, 2000). Le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et le plomb (Pb); ne sont pas des métaux essentiels ; leur rôle positif dans les cellules, à ce jour, n'est pas connu (Altindag *et al.*, 2005).

Les problèmes associés à la contamination par les métaux lourds ont été tout d'abord mis en évidence dans les pays industrialisés, en raison de leurs développements industriels plus importants, et spécialement à la suite d'accidents dus à une pollution par le cadmium en Suède et le mercure au Japon (maladie de Minamata de 1949 à 1965) (Kurland *et al.*, 1960; Nitta, 1972; Gigon, 1975 ; Goldberg, 1979 ; Jobin, 2006). Bien que le niveau des activités industrielles soit relativement moins élevé dans la plupart des pays africains, on y observe une prise de conscience croissante sur la nécessité de gérer rationnellement les ressources aquatiques et notamment de maîtriser les déversements de déchets dans l'environnement (Rashed, 2001 ; Chale, 2002 ; Okwonko *et al.*, 2005 ; Assonye *et al.*, 2007).

Spécifiquement pour le Tchad, son paysage économique est caractérisé par une industrie à l'état embryonnaire. L'industrie chimique à proprement parler est inexistante. L'exploitation du pétrole est réduite à l'exportation du brut. Mais le Tchad importe beaucoup de produits chimiques à usage agricole, sanitaire et domestique. L'utilisation de ces produits n'est pas sans conséquence sur la santé humaine et sur l'environnement. Le cas des polluants

organiques persistants (POPs), recensés au Tchad est la démonstration du danger que présentent les produits chimiques (MEE, 2005).

La ville de N'djamena est une bonne représentation de la pollution due aux effluents liquides urbains. En effet, le réseau d'assainissement est pratiquement inexistant et seulement visible au niveau des grandes artères de la ville. Dans les autres rues ou ruelles, les égouts à ciel ouvert sont creusés à même le sol et la pollution se déverse dans le fleuve Chari, sans aucun traitement (Merle *et al.* 2007). Pour les autres villes, comme Sarh et Moundou, la capitale économique ; situés au bord des fleuves Chari et Logone, on y rencontre les usines textiles, d'huilerie-savonnerie, les usines de la Société Nationale Sucrière (SONASUT) et de la Cotontchad dont, les effluents sont déversés dans ces fleuves. En plus de cela, le Lac Tchad qui reçoit toutes ces eaux, connaît un assèchement spectaculaire (Images NASA, 2002). Sa surface s'est considérablement réduite depuis 1960, date à laquelle elle était encore de 26 000 km². En 2000, elle ne couvrait plus que 1500 km², avec une profondeur maximale de sept mètres (Les Guides Ecofinance, 2006). L'eau du Lac Tchad s'est évaporée en raison des sécheresses de 1972-1973 et 1982-1984, les cultures irriguées comme le riz et la déforestation (Merle *et al.*, 2007).

La pêche dans les eaux intérieures constitue une source de nourriture et d'emploi pour de millions d'individus en Afrique intertropicale, trois millions de personnes dans les seuls pays sahéliens (Bronzon et Breuil, 1992). Cependant, la pollution de l'eau peut contaminer les poissons avec les métaux toxiques résultant de plusieurs sources, telles que le rejet accidentel des déchets chimiques, l'air pollué, les déchets industriels, le drainage agricole, les égouts domestiques et les produits de combustion des bateaux de pêche (Handy, 1994; Jent *et al.*, 1998).

Devant ces réalités, où tous les effluents urbains, agricoles et industriels, sont directement rejetés dans les fleuves Chari et Logone ; qui se jettent dans le Lac Tchad ; et l'assèchement que connaît ce lac, nous nous sommes posés les questions suivantes ?

- Que deviennent les métaux lourds, de ces effluents, dans les eaux et les sédiments du Lac Tchad ?
- Ces métaux ne seraient-ils pas en train de s'accumuler dans les poissons du Lac ?

Notre présente étude, vise donc l'évaluation de la teneur en métaux lourds tels que le plomb, le cadmium et le chrome des sédiments, et la contamination par ces métaux des poissons et des eaux du Lac Tchad. Trois espèces de poissons, les plus capturées et consommées ont été choisies, en fonction des travaux antérieurs (Iltis, 1975) : il s'agit des carpes (*Tilapia nilotica*), des machoirons (*Arius latiscutatus*) et des capitaines (*Lates niloticus*).

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

A- Généralités sur la pollution

1. La pollution

La législation européenne définit la pollution comme « l'introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de substances ou de chaleur dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité des écosystèmes aquatiques ou des écosystèmes terrestres dépendant directement des écosystèmes aquatiques, qui entraînent des détériorations aux biens matériels, une détérioration ou une entrave à l'agrément de l'environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier » (Directive 2000/60/CE).

D'après le Dictionnaire de l'environnement, *les termes normalisés de l'AFNOR*, le polluant est défini comme un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou une partie d'un écosystème ou de l'Environnement en général (Lexique français-anglais, AFNOR, 1994).

La notion de pollution appelle donc celle de contamination d'un ou plusieurs compartiments des écosystèmes (air, eau, sol), d'un organisme (qui peut être l'Homme) ou d'un groupe d'organismes, ou ayant une incidence sur l'écosystème, au delà d'un *seuil* ou *norme*. La contamination peut notamment s'étendre ou se modifier via le réseau trophique (chaîne alimentaire).

Les langages scientifiques, législatifs et normatifs ont souvent retenu le mot « contamination ». Le mot « pollution » devenant alors le mot qualifiant une contamination au-delà d'une norme, seuil, loi, ou hypothèse. En France, on ne devrait donc théoriquement parler de pollution que dans le cas de dépassement des seuils ou normes (<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&définition=369>).

De nos jours, ce sont presque tous les compartiments des écosystèmes (air, eau, sol) et tous les organismes qu'ils contiennent, qui sont menacés par la pollution ou sont contaminés. C'est pourquoi, l'on distingue la pollution de l'air, des sols et de l'eau (douce ou marine) :

➤ La pollution du sol peut être diffuse ou locale, d'origine industrielle, agricole. Ces pollutions agricoles peuvent toucher les nappes phréatiques d'une part et en contaminer par bioaccumulation les cultures poussant sur ces sols d'autre part.

➤ La pollution de l'air, provoquée par des polluants dits atmosphériques (particules) est plus délicate à régler efficacement, dans un cadre local ou national, que

beaucoup d'autres formes de pollutions (de même pour les pollutions marines). Des conventions mondiales (CCNUCC, Convention de Vienne sur la protection de la couche d'Ozone, convention de Stockholm sur les POPs) concernent les polluants destructeurs de la couche d'ozone ou les gaz à effet de serre (GES), tous capables de modifier le fonctionnement planétaire du monde vivant. Les effets allergènes (rhinite, conjonctivite, asthme) des particules biologiques (pollens, spores, microbes ou virus) sont en augmentation, et ils semblent souvent exacerbés par les polluants urbains et générés par les transports (Environnement, Risques & Santé., 2002).

➤ La pollution de l'eau peut se présenter sous différentes formes : chimique, bactériologique ou thermique. Les eaux ou masses d'eau concernées peuvent être douces, saumâtres ou salées, souterraines ou superficielles. La lutte contre cette pollution est d'autant plus difficile que ce qui est au fond de l'eau, ou dilué dans l'eau est souvent invisible, et que certaines substances toxiques infiltrées dans le sol ne produisent souvent leur effet qu'après un long délai et que de nombreux polluants agissent en synergies complexes. La pollution de l'eau peut avoir diverses origines parmi lesquelles : la pollution de l'eau par les produits phytosanitaires, par les nitrates et phosphates (eutrophisation), par les Polychlorobiphényles (PCB), par les hydrocarbures (marée noire), par les bactéries (coliformes fécaux), par le drainage minier acide (solution minérale acide s'écoulant régulièrement d'une mine), par les métaux lourds (Cd, Hg, Pb, Cr, etc.) (Krishna Das, 2005). ; ce dernier étant le sujet qui nous préoccupe dans le présent travail. Il faudrait arriver à diminuer la pollution de l'eau par les usines et le drainage agricole et éviter de rejeter les déchets ménagers dans l'eau.

2. Les sources de pollution

La pollution peut être anthropique (c'est-à-dire créée par l'Homme) ou d'origine non humaine.

2.1. La pollution d'origine humaine

Les pollutions d'origine humaine, dites aussi anthropiques, ont de nombreuses formes en pouvant être locales, ponctuelles, accidentelles, diffuses, chroniques, génétiques, volontaires, involontaires, etc. On parle de :

- « pollution diffuse », lorsque les sources d'un polluant sont multiples (pots d'échappement, épandage de pesticides..) et de,
- « pollution chronique » lors d'émissions répétées ou constantes de polluant, et parfois lorsqu'un polluant est très rémanent.

2.2. La pollution d'origine non humaine

Ces pollutions peuvent être :

- les conséquences directes ou indirectes de catastrophes naturelles, tels que le volcanisme;
- une pollution liée à des phénomènes naturels, tels que les éruptions solaires;
- une pollution d'un captage d'eau potable par un animal qui fera ses besoins à proximité, ou qui serait mort et en décomposition dans l'eau.

3. Les types de polluants

Les polluants sont classés en polluants physiques (radiations ionisantes, pollution thermique), polluants chimiques (hydrocarbures, matières plastiques, pesticides, détergents, composés organiques de synthèse divers, dérivés du soufre, nitrates, phosphates, métaux lourds, fluorures, particules minérales (aérosols) et polluants biologiques (matière organique morte, microorganismes pathogènes) (Krishna Das, 2005). Le même auteur, divise la classe des micropolluants en :

3.1. Micropolluants organiques non pesticides.

Il s'agit des hydrocarbures aromatiques polycycliques et hétéroaromatiques (PAH), des paraffines chlorées, des aromatiques halogénés, des aromatiques halogénés avec oxygène (dioxines, furannes, polychlorophénols), des aromatiques volatils (benzène, toluène, xylène), des amines aromatiques (AA), des esters phtaliques, des colorants, des pigments, des surfactants, des produits pharmaceutiques...

3.2. Pesticides et Biocides.

On y trouve les organo-halogénés aliphatiques, les acides phénoxyacétiques, les diphényls (DDT), les cyclodiènes, les triazines, les carbamates, les organophosphorés et les organomercurels.

3.3. Micropolluants minéraux.

Ce sont les métaux traces, la silice et silicates, l'amiante et les fluorocarbones (Krishna Das, 2005).

B- La pollution par les métaux lourds

1- Définition des métaux lourds

La notion de métaux lourds est apparue lorsque les premiers biologistes ont cherché à caractériser les protéines qui contenaient du soufre. Les sels solubles dans l'eau du plomb, du

mercure et du cadmium, ajoutés à une solution aqueuse d'une protéine, conduisaient à la formation de précipités volumineux et très denses dus à une combinaison solide entre les fonctions soufrées de ces protéines et ces ions métalliques, selon la réaction suivante :



SH : fonction soufrée de la protéine (S = soufre, H = hydrogène)

M^{++} : forme ionisée divalente du métal lourd (Hg^{++} pour le mercure, Pb^{++} pour le plomb et Cd^{++} pour le cadmium). Les propriétés néfastes du mercure, du plomb et du cadmium, à savoir : grande affinité pour le soufre, forte bioaccumulation dans les chaînes alimentaires et importante toxicité pour de nombreux êtres vivants (microbes, plantes, animaux, Homme), se retrouvent aussi chez certains autres éléments comme le thallium, l'argent ou l'or... tous reconnus toxiques mais qui ne doivent pas être classés parmi les « métaux lourds », terme uniquement réservé au mercure, au plomb et au cadmium (Picot, 2002).

Le rapport d'information au Sénat français « *Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé* » (Rapport n° 261, Sénat français, 2001), indique : « L'appellation métaux lourds est cependant une appellation courante qui n'a ni fondement scientifique, ni application juridique ».

C'est pourquoi la classification des métaux lourds est souvent discutée.

Par confusion, compte tenu du caractère potentiellement toxique des composés de certains des métaux lourds (mercure, plomb, cadmium en particulier), on inclut même parfois dans la catégorie des métaux lourds certains éléments toxiques comme l'arsenic (élément non métallique), voire certains composés organiques. Il vaut mieux dans ce cas parler d'"éléments traces".

Cette notion de « métaux lourds » est maintenant uniquement médiatique et sans valeur scientifique (Picot, 2002). Toujours, selon le même auteur, pour les scientifiques, ces métaux lourds doivent être regroupés dans ce que l'on appelle les « métaux en traces », ETM, car, normalement, on les retrouve dans les milieux naturels, en très faibles concentrations. Le mercure (Hg), le plomb (Pb) et le cadmium (Cd), considérés ici comme les seuls métaux lourds, sont en fait des éléments traces toxiques et il faut les regrouper ainsi si l'on veut concilier le langage populaire et l'exactitude scientifique

2- Caractéristiques de quelques métaux lourds

Tableau 1 : Quelques caractéristiques physiques des métaux lourds recherchés.

Elément	Masse atomique g/mol	Densité	Tf, °C	Téb, °C
Cr	51,996	7,20	1857±20	2672
Cd	112,41	8,65	321	765
Hg	200,59	13,59	- 39	356,60
Pb	207,20	11,34	327	1740

Source : Laboratory chemicals, 1984.

3- Les sources de contamination

Les métaux lourds qui entrent dans l'environnement aquatique proviennent de sources naturelles et de sources anthropogènes.

3-1. Les sources naturelles

Leur entrée peut être le résultat soit de déversements effectués directement dans les écosystèmes marins et dans les eaux douces, soit d'un cheminement indirect comme dans le cas des décharges sèches et humides et du ruissellement agricole. Parmi les importantes sources naturelles, citons l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies de forêts (Biney *et al.* 1995).

Il y a d'une part, les oxydes et silicates ; les oxydes étant libérés de la roche par érosion et transportés tels quels dans les sols et sédiments. Et, il y a d'autre part, les sulfures et carbonates, très altérables, qui seront attaqués chimiquement. Les métaux changeront de support. Une partie soluble sera évacuée avec l'eau, vers les sols, les sédiments ou la nappe phréatique. Une autre partie sera piégée dans les argiles et sédiments.

3-2. Les sources anthropogènes

Les sources anthropogènes sont les suivantes:

- Effluents d'extractions minières
- Effluents industriels
- Effluents domestiques et ruissellements orageux urbains
- Lessivage de métaux provenant de décharges d'ordures ménagères et de résidus solides
- Apports de métaux provenant de zones rurales, par exemple métaux contenus dans les pesticides

- Sources atmosphériques, par exemple combustion de carburants fossiles, incinération des déchets et émissions industrielles
- Activités pétrochimiques (Biney *et al.* 1995).

Les milieux aquatiques sont très sensibles aux éléments en traces par la coexistence de deux phénomènes de bioaccumulation et de biomagnification : les éléments en traces se concentrent au fur et à mesure des absorptions dans la chaîne alimentaire (eau \Rightarrow plancton \Rightarrow poisson herbivore \Rightarrow poisson carnivore \Rightarrow homme...)

L'industrie est responsable de la quasi totalité des rejets de métaux lourds dans l'eau. La nécessité de réduire ces rejets n'est plus discutée.

4- La bioaccumulation des métaux lourds

La bioaccumulation désigne la capacité des organismes à absorber et concentrer dans tout ou une partie de leur organisme (partie vivante ou inerte telle que l'écorce ou le bois de l'arbre, la coquille de la moule, la corne, etc..) certaines substances chimiques, éventuellement rares dans l'environnement (oligoéléments utiles ou indispensables, ou substances toxiques indésirables) (http://europa.eu.int/comm/entreprise/reach/index_fr.htm).

4-1. La bioaccumulation par l'individu : la bioconcentration

Le mot « bioconcentration » désigne le phénomène d'augmentation de la concentration d'un élément (oligoélément, polluant, radionucléide...) par le fait d'un organisme vivant ou d'une association d'êtres vivants capable de capter cet élément à partir du milieu et de le conserver (<http://www.ifremer.fr/deleceen/projects/bioaccumulation/bioconcentration.htm>).

Le « Facteur de bioconcentration » ou FBC désigne le rapport entre concentration du composé chimique (métal lourd par exemple) dans l'organisme vivant et celle dans le milieu (eau/air/sol). Ce facteur permet d'établir la bioaccumulation. D'après Kalfakakour et Akrida-Demertzi (2000), le facteur de bioconcentration, est exprimé par la relation : $FBC = \frac{\text{concentration du polluant dans le poisson}}{\text{concentration du polluant dans l'écosystème du lac}}$. Un facteur supérieur à 1 indique une bioaccumulation, selon ces auteurs.

Par exemple : les moules sont des espèces bioaccumulatrices qui peuvent bioconcentrer des molécules de l'environnement à des teneurs de plusieurs centaines de milliers de fois supérieures à celles qui sont mesurées dans l'eau. Les champignons font de même pour de nombreux métaux lourds dans le sol, et les lichens ou les mousses peuvent bioconcentrer des polluants de l'air (éléments traces métalliques tels que le mercure, le cadmium ou le plomb).

La bioconcentration permet à l'échelle du réseau trophique la biomagnification. Elle dépend d'abord du caractère plus ou moins persistant de la molécule concernée, ensuite du bilan absorption/excrétion, de la métabolisation mais aussi de la perte de matière lors de la reproduction, du taux de croissance de l'organisme en question,

4-2. La bioaccumulation entre individus : la bioamplification

La bioaccumulation s'effectue par le biais de l'alimentation d'organismes, et via tout le réseau trophique. Naturellement, plus la chaîne trophique est longue, plus l'accumulation est importante et plus les effets délétères risquent d'être marqués. Les prédateurs, situés en parties terminales des chaînes alimentaires sont donc particulièrement vulnérables à ce type de pollution, et leur présence est le signe d'une qualité satisfaisante du milieu où ils ont effectué l'essentiel de leur croissance. Il n'est pas rare de constater un facteur de bioaccumulation de l'ordre de 100 000. Les moules et huîtres peuvent concentrer de 700 000 fois à 1 million de fois des substances quasi-indétectables dans la mer, oligoéléments dans le cas de l'iode ou toxiques dans le cas du plomb, mercure ou cadmium par exemple (Picot, 2002).

Certaines substances bioaccumulées par les plantes, les animaux et les humains sont connues pour être toxiques, cancérigènes ou tératogènes ou induisant la mort, une stérilité, des malformations, etc. C'est le cas du benzo (a) pyrène (de la classe des hydrocarbures aromatiques polycycliques), des polychlorobiphényles (PCB), des perturbateurs endocriniens, du plomb et d'autres métaux présents dans l'environnement du fait de la pollution (<http://ifremer.fr/delec-en/projets/bioaccumulation/bioamplification.htm>).

La bioaccumulation de substances toxiques peut conduire à des catastrophes, comme dans le cas de la maladie de Minamata qui a touché presque deux millions d'humains, morts ou ont été gravement empoisonnés par du mercure méthylé par des bactéries puis concentré par les poissons évoluant en aval des effluents pollués par une usine (l'usine pétrochimique de Minamata, au sud-ouest du Japon, qui utilisait comme catalyseur, HgO) (Jobin, 2006).

La bioaccumulation et la bioturbation combinées jouent un rôle fondamental au sein de la biosphère et des cycles biogéochimiques. La notion de bioturbation désigne le phénomène de transfert d'éléments nutritifs ou chimiques par des êtres vivants au sein d'un compartiment d'un écosystème ou entre différents compartiments.

Dans un environnement pollué, La bioturbation, associée au phénomène de bioconcentration contribue à la contamination généralisée des prédateurs situés en tête du réseau trophique.

Les POPs (Polluants organiques persistants) entrent dans la catégorie des substances bioaccumulées et très toxiques pour les organismes vivants et plus particulièrement l'homme.

Indicateur de pollution

Certains organismes connus pour accumuler des polluants sont utilisés comme bioindicateur ou pour la bioévaluation environnementale :

- les lichens accumulant les polluants permettent une analyse rétrospective de leur exposition aux métaux lourds ou aux radionucléides.

- la moule zébrée (moule d'eau douce) (*Dreissena polymorpha*) accumule les éléments métalliques (Mersch, 1993).

L'écotoxicologie qui est une discipline à l'interface entre l'écologie et la toxicologie, née de la reconnaissance du fait qu'un nombre croissant de substances toxiques ont contaminé et continuent à contaminer toute la biosphère, étudie le comportement et les effets de ces substances toxiques sur les écosystèmes. Comme son nom l'indique, elle tente de combiner deux sujets très différents :

- l'écologie
- et la toxicologie qui est une science dont l'objet est « l'étude des polluants toxiques dans les écosystèmes et la biosphère toute entière » (Ramade, 1992).

Il est de plus en plus demandé aux écotoxicologues de prévoir les effets des pollutions en nature, intensité et durée.

C- Impacts des métaux lourds sur la santé

Parmi les éléments chimiques minéraux, les métaux occupent une place prépondérante dans notre monde moderne car ils interviennent dans la plupart des secteurs d'activité. Par ailleurs, ils sont, pour beaucoup d'entre eux, indispensables au monde vivant (fer, zinc...) parfois en très faible quantité (oligo-éléments essentiels). Certains de ces oligo-éléments (chrome, nickel, manganèse...) indispensables à petite dose, deviennent toxiques à forte concentration. Enfin, il y a des métaux comme le mercure, le plomb et le cadmium qui sont uniquement toxiques pour les organismes vivants (Picot, 2002).

Le cadmium (Cd), le plomb (Pb) et le mercure (Hg) sous sa forme organique (methylmercure, MeHg), sont les polluants particulièrement visés, à cause de leur large distribution et leurs implications profondes dans la santé humaine (Clarkson et Magos, 2006; Islam *et al.*, 2007; Mergler *et al.*, 2007).

L'intoxication au cadmium, chez la femme enceinte, a été liée à la diminution, de la durée de la grossesse, du poids du nouveau-né et récemment, au dysfonctionnement du

système endocrinien et/ou immunitaire chez l'enfant (Schoeters *et al.*, 2006). L'exposition au plomb, a été maintes fois, liée à un retard dans le développement neurocomportemental (Lidsky et Schneider, 2003), tout comme le MeHg, qui nuit au neurodéveloppement et implique des effets allant de la mort du fœtus au retard du développement cognitif (Castoldi *et al.*, 2003).

1- La toxicité du mercure

1-1. Les sources de mercure

Dans la nature, le mercure peut se rencontrer à l'état élémentaire métallique. Dans l'organisme, le mercure pénétrera surtout sous forme de vapeurs, par la voie respiratoire. Le mercure peut aussi se rencontrer sous forme ionisée, principalement à l'état de cation divalent mercurique (Hg^{++}), par exemple dans les oxydes (HgO), les sulfures (HgS) ou les sels hydrosolubles comme le nitrate $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$. Tous ces composés peuvent se retrouver dans les minerais présents dans le sol, ou dans les process de la métallurgie du mercure (Picot, 2002). Le cation méthylmercurique ($\text{CH}_3 - \text{Hg}^+$) correspond à la forme organométallique, espèce dans laquelle se retrouve principalement le mercure dans les animaux marins contaminés comme les poissons gras (thons, espadons, requins...), les crustacés, les huîtres et les moules. Chez l'Homme, l'apport de mercure par l'alimentation est majoritairement (au moins 90 %) sous forme de cation méthylmercurique ($\text{CH}_3\text{-Hg}^+$), fourni pour l'essentiel par la consommation de produits marins. En France, la dose moyenne d'ingestion du mercure est de 267 μg par semaine et par personne, pour une dose hebdomadaire tolérable fixée par l'OMS à 200 μg (Picot, 2002).

Le mercure a une forte tendance à la bioconcentration dans la chaîne alimentaire. Ainsi, sous sa forme ionisée Hg^{++} , en faible concentration dans une eau peu active (lacs, baies fermées...) peut facilement être stocké par les bactéries présentes dans les sédiments (vase) qui vont le transformer en une molécule soluble dans les graisses : le cation méthylmercurique ($\text{CH}_3\text{-Hg}^+$). Les bactéries servant de nourriture au plancton, qui lui-même est consommé par les poissons herbivores, proies à leur tour de poissons carnivores (thons, requins...) forment une chaîne alimentaire de bioconcentration très importante. Le facteur de concentration du mercure de l'eau jusqu'aux poissons gras carnivores, qui servent de nourriture à l'Homme (le chaînon final), est de l'ordre du million, ce qui est considérable, ce qui a conduit plusieurs pays (Suède, Canada...) à conseiller de limiter la consommation de ces aliments marins (Picot, 2002).

1-2. L'absorption, la répartition et l'excrétion du mercure.

Le mercure peut exister sous trois formes différentes : le mercure élémentaire (Hg^0), le cation mercurieux (Hg^+) et le cation mercurique (Hg^{++}). Le mercure élémentaire, le seul métal liquide à température ambiante, peut facilement passer à l'état gazeux. Ainsi, à l'état de vapeur, le mercure va pénétrer préférentiellement (80 %) dans l'organisme par les voies respiratoires. La légère liposolubilité du mercure va lui permettre de traverser facilement les alvéoles pulmonaires et de passer dans le sang, grâce auquel il va se répartir dans tout l'organisme. Sa lipophilie va aussi lui permettre de traverser la barrière hématoencéphalique, protectrice du système nerveux central, ainsi que le placenta qui, chez la femme gestante, assure l'alimentation sanguine dans un premier temps de l'embryon puis du fœtus. Grâce à leur lipophilie, le mercure élémentaire, mais surtout le cation méthylmercurique, vont traverser la barrière placentaire et, chez une femme gestante, perturber le développement de l'embryon, entraînant soit une fausse couche, soit l'apparition, chez le futur bébé, de malformations (absence de membres...) (Picot, 2002).

Les réactions équilibrées entre une forme réduite (Hg^+) et une forme oxydée (Hg^{++}) constituent un couple oxydoréducteur. De tels couples oxydoréducteurs peuvent jouer un rôle important dans les processus inflammatoires et toxiques.

De par sa structure renfermant une partie ionisée et une partie lipophile, la solubilité du cation méthylmercurique sera partagée entre l'eau et les graisses, comme l'indique le schéma ci-dessous :

Partie lipophile ---- $\text{CH}_3 - \text{Hg}^+ < \text{----}$ Partie hydrophile (Picot, 2002).

Dans une seconde étape, le cation méthylmercurique pourra se lier avec un nouveau groupement méthyle, formant ainsi le diméthylmercure ($\text{CH}_3\text{-Hg-CH}_3$), molécule organométallique neutre, totalement soluble dans les graisses et d'une toxicité redoutable.

L'absorption des composés mercurieux ou mercuriques par voie digestive, principalement au niveau intestinal, est peu importante (moins de 5 % sera absorbé, le reste étant éliminé dans les selles). De par sa liposolubilité, le cation méthylmercurique va pénétrer très facilement dans l'organisme par la voie intestinale (95 à 100 %) puis se répartira dans le sang et ira rapidement se localiser dans le système nerveux tant central que périphérique ; sa neurotoxicité engendrera souvent encéphalite et polynévrite.

Grâce à sa solubilité dans les lipides, le mercure métallique (Hg^0) va se concentrer dans le système nerveux, surtout au niveau du cerveau, entraînant un processus inflammatoire de type encéphalite. Sous forme de sel mercurique (Hg^{++}) hydrosoluble, la cible principale sera les reins, dont l'inflammation va conduire à une néphrite souvent mortelle (Picot, 2002).

2- La toxicité du plomb

2.1 Les sources de contamination au plomb

La contamination par le plomb peut être liée à l'activité professionnelle ou à des sources environnementales. Les principales sources de plomb sont :

- la circulation automobile par combustion des additifs au plomb dans les moteurs à essence (plomb tétraéthyle).
- l'exploitation et le traitement des minerais de plomb,
- l'eau de distribution, qui, si elle est agressive (c'est à dire peu minéralisée), peut être contaminée au contact de vieilles tuyauteries en plomb, actuellement interdites.
- l'alimentation; le plomb provient des procédés de stockage et de fabrication (conserverie) et des boissons alcoolisées. Certains récipients, vernissés au plomb ou en alliage plomb-étain (faux "étains"), peuvent relarguer du plomb au contact des aliments.
- les peintures riches en plomb (céruse) des habitations anciennes (ingestion d'écaillés ou de poussières par les enfants) (pica = déviation du goût vers des substances non comestibles). L'intoxication par le plomb, ou saturnisme est la première maladie reconnue d'origine professionnelle en France (tableau n°1 du régime général) (Danel, 1997).

2.2 L'absorption du plomb

L'absorption est surtout respiratoire en milieu professionnel (rétention pulmonaire de 40 à 70%), digestive (= 10% du plomb ingéré chez l'adulte mais 50% chez l'enfant où l'absorption est favorisée / vitamine D, graisses et carence en calcium et en fer). Une résorption cutanée est possible pour les composés organiques du plomb (Danel, 1997).

2.3 La cinétique du plomb

Distribution – Stockage : 90% véhiculé par le globule rouge (sous forme liée non diffusible). Stockage : plus de 90% du pool de plomb dans l'os (de 10 à 20 ans) (relargage possible si décalcification, fractures, grossesse, ménopause), 5-10% dans les tissus mous. Passage transplacentaire (risque d'intoxication fœtale lorsque la mère est exposée) et hémato-encéphalique (important chez l'enfant). En général, l'élévation du taux de plomb dans le sang traduit une exposition récente au métal (Chanel *et al.*, 1999).

Le passage plus important du métal à travers la barrière hémato-encéphalique chez l'enfant rend compte de la prédominance des manifestations encéphaliques dans le saturnisme de l'enfant (Danel, 1997).

2.4 Les sites d'action du plomb

Les mécanismes d'action toxique du plomb sont: Il entraîne une inhibition enzymatique de la biosynthèse de l'hème, par fixation sur les groupes SH (mécanisme thioloprive), ayant pour conséquence, l'accumulation de l'ALA dans le sang et l'urine puis l'apparition d'une anémie. De plus, il diminue la durée de vie des hématies, modifie le métabolisme du fer par diminution de sa capacité de fixation. A dose d'exposition faible mais prolongée, ils agissent sur le système nerveux (déficits neuropsychiques) et la pression sanguine (hypertension) (Danel, 1997).

2.5 Elimination du plomb

L'élimination du plomb est essentiellement fécale chez le sujet non exposé (directement ou par voie biliaire). La voie urinaire (80%) est la principale voie d'excrétion du plomb absorbé, mais elle est lente, T_{1/2} vie dans le sang environ 30 jours ; T_{1/2} vie dans les os 10 ans (Danel, 1997).

2.6 Intoxications et effets du plomb

Le plomb, substance toxique cumulative, entraîne notamment des troubles digestifs, neurologiques et rénaux lors des intoxications (saturnisme). L'intoxication chronique par le plomb appelée saturnisme peut se manifester de façon extrêmement différente d'une personne à l'autre. Les manifestations digestives se traduisent par la "colique de plomb", crise douloureuse abdominale très violente évoluant par paroxysmes. Il n'y a pas de contracture et les douleurs s'accompagnent d'un pouls calme, bien frappé, d'une élévation modérée de la tension artérielle et d'une constipation (Danel, 1997).

Les effets hématologiques se traduisent par une anémie. L'atteinte rénale, tardive dans le saturnisme, réalise une insuffisance rénale chronique. L'hypertension artérielle est liée à l'action du métal sur la musculature vasculaire. Des crises de goutte peuvent s'observer chez l'adulte, le plomb augmentant la réabsorption tubulaire de l'acide urique. Le plomb peut affecter la fertilité chez l'homme par oligospermie. Son effet tératogène n'est pas démontré dans l'espèce humaine. Il est foetotoxique et peut être responsable de mort in utéro, de prématurité ou de troubles du développement cérébral. Une plombémie de 200 µg/l chez l'homme, correspondrait à une dose sans effets objectifs pour 98% de la population (Danel, 1997).

D'après l'étude réalisée par le Docteur Jeanne Perrin (2007) sur les effets de l'environnement sur la reproduction, et particulièrement sur :

- l'influence des expositions in utero/néonatale sur la santé reproductive et;
- l'influence des expositions à l'âge adulte sur la fertilité et le développement, le taux plasmatique du plomb est corrélé à :
 - la baisse des hormones sexuelles (Gustafson *et al.* 1989)
 - la baisse des paramètres spermatiques (Gennart *et al.* 1992, Chowdhury *et al.* 1993, Bonde *et al.* 2002).
 - une augmentation du délai à concevoir (Apostoli *et al.* 2000, Sallmen *et al.* 2001, Bonde *et al.* 2003, Jofe *et al.* 2003).
 - une baisse du taux de fécondité (Coste *et al.* 1991, Bonde *et al.* 1997). Selon Perrin, un taux plasmatique du plomb > 45 µg/dl : implique une altération du sperme et de la fertilité.

D'après l'expertise collective : *Plomb dans l'environnement : quels risques pour la santé ?* réalisée par un groupe de douze experts, qui a analysé près de 1600 articles scientifiques, médicaux et socio-économiques (Chanel *et al.*, 1999), l'abandon progressif de l'essence plombée a eu pour conséquence une chute du taux d'imprégnation de la population générale dans la plupart des pays industrialisés et en particulier en France. En 20 ans, le taux de plomb dans le sang (la plombémie) a en moyenne diminuée de 50% dans la population française. Il est passé de 125µg/L à 65µg/L aujourd'hui. A titre de comparaison, la plombémie moyenne de la population est de 23µg/L aux Etats-Unis. Le même document précise que l'alimentation représente environ la moitié des apports journaliers en plomb chez l'enfant et l'adulte vivant dans un environnement peu exposé.

Une plombémie de 250µg/l constitue pour le groupe d'experts, le seuil à partir duquel des mesures d'urgence s'imposent et un suivi médical assuré.

Dans le cas de populations professionnellement exposées à de fortes doses de plomb (plombémies supérieures à 400µg/l), des travaux ont montré que le plomb peut entraîner une anémie, une diminution de la filtration glomérulaire, une hypertension artérielle et exercer également des effets sur la fonction gonadique. Par ailleurs, des expositions plus faibles (plombémies inférieures à 400µg/l) sembleraient avoir des effets sur la croissance foetale, la durée de la gestation, l'apparition de malformations. Les intoxications sévères se manifestent pour des plombémies supérieures à 700µg/l ; elles sont éventuellement associées à des encéphalopathies responsables de séquelles neurologiques et psychomotrices graves. Une entreprise est soumise à la législation plomb si la concentration atmosphérique en plomb est supérieure à 75 µg/m³ et la valeur limite d'exposition professionnelle (VME) à ne pas dépasser est de 150µg/m³ (Chanel *et al.*, 1999).

3- La toxicité du cadmium

➤ Sources d'exposition:

Le cadmium est présent dans presque tous les minerais de zinc (la teneur en cadmium varie de 0,01 à 0,05%), et est obtenu industriellement comme sous-produit de la métallurgie du zinc. Sa production dépend de celle du zinc, dans une proportion variable de 1,8 à 6 kg de cadmium/tonne de Zn élaboré (3 kg/tonne de zinc en moyenne). Le cadmium est également présent dans des minerais de plomb et de cuivre, ainsi que dans des phosphates naturels (34 ppm pour les phosphates jordaniens, 380 ppm pour les phosphates tunisiens). Le cadmium semble quantitativement absorbé d'abord par inhalation (fumée, poussières) et de façon moindre par voie gastro-intestinale. Il n'est pas absorbé par la peau. La fumée de cigarette constitue la source principale de contamination de la population générale. D'autres objets incinérés pouvant libérer du cadmium sont : les peintures, les PVC, etc. (Rapport 261 au Sénat français, 2001).

➤ Effets du cadmium

Très toxique sous toutes ses formes (métal, vapeur, sels, composés organiques), le cadmium est l'un des rares éléments n'ayant aucune fonction connue dans le corps humain ou chez l'animal. Il faut éviter son contact avec des aliments. Chez l'Homme, il provoque notamment des problèmes rénaux et l'augmentation de la tension. Le Cadmium s'accumule dans les organes au long de la vie. Il s'accumule provisoirement dans le foie avant de s'accumuler dans les reins où au delà de 200 mg par kg chez l'adulte, il provoque des lésions irréversibles. Dans les années 1950, au Japon, une intoxication aiguë au cadmium a donné une maladie des reins et des os, nommée « *itai-itai* », qui signifie « *j'ai mal, j'ai mal* », la phrase souvent répétée par les malades. Elle se caractérise par des douleurs au dos et dans les articulations, de l'ostéomalacie (rachitisme adulte), des fractures osseuses, et occasionnellement des défaillances rénales. Cette maladie affecte le plus souvent les femmes et les facteurs de risque sont la multiparité et l'alimentation de pauvre qualité. Les autres conséquences de l'exposition chronique au cadmium sont l'anémie, la coloration jaunâtre des dents, la rhinite, l'ulcération occasionnelle du septum nasal, les dommages au nerf olfactif et la perte de l'odorat (Rapport 261 au Sénat français, 2001) .

En 1993, les données de l'évaluation du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) ont conduit à classer le cadmium en cancérigène catégorie 1 « *cancérigène avéré pour l'homme* ». L'exposition professionnelle au cadmium peut être considérée comme responsable d'une augmentation significative du cancer du poumon et les ostéomalaciques (ramollissement généralisé des os par résorption diffuse des sels calcaires de la substance

osseuse). Les fumées d'oxyde de cadmium sont des irritants pulmonaires sévères (Pilliere, 2007). Sept études de cohortes ont été utilisées pour l'évaluation du CIRC. Dans chacune de ces études, le rôle des co-expositions est mentionné, notamment avec le béryllium, le chrome, le nickel, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et surtout avec l'arsenic comme dans la cohorte américaine la plus importante dans le secteur de la récupération des batteries. La situation de co-exposition la plus fréquemment étudiée dans le secteur de la fabrication des piles est celle associant l'oxyde de cadmium (CdO) au nickel.

L'apparition du cancer broncho-pulmonaire semble nécessiter des niveaux d'expositions cumulées élevés au cadmium. Le cadmium est principalement absorbé par inhalation et se fixe à 30 - 40% dans les reins où il entraîne une perte anormale de protéines par les urines (protéinurie).

D'après le même document, les mécanismes d'actions du cadmium sont multiples :

- il agirait comme un génotoxique indirect mais aussi direct (liaison à l'ADN) et également,
- comme un co-génotoxique par le biais d'une inhibition de la réparation de l'ADN et également de l'apoptose.

L'un des secteurs d'activité où les plus fortes expositions ont été mesurées, est la fabrication d'accumulateurs et de piles électriques au nickel-cadmium et de la récupération des matières métalliques contenant du cadmium. C'est particulièrement, dans l'industrie chimique, et celles du caoutchouc et des plastiques, que les salariés étaient exposés au cadmium et à ses composés.

La valeur limite moyenne d'exposition (VME) recommandée pour le cadmium et ses composés est de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il s'avère également que le cadmium a la capacité de modifier le matériel génétique, en particulier les chromosomes. Des analyses réalisées chez l'Homme, ont révélé que :

– un taux élevé de cadmium était corrélé à la baisse de la mobilité, de la concentration, une modification de la morphologie des spermatozoïdes (Xu *et al.* 1993, Chia *et al.* 1994, Pant *et al.* 2003)

– un taux élevé de cadmium potentialise l'effet du varicocèle.

Ces auteurs expliquent le mécanisme d'action du cadmium de la manière suivante:

- Le Cd intervient avec le Zn, Cu, Fe, Ca et par les canaux Ca^{++} sur la membrane des spermatozoïdes ;
- Le Cd induit une toxicité indirecte par dommage oxydatif et peroxydation lipidique (Katakura and Sugawara 1999) ;

- Il provoque une altération par réaction acrosomique (Benoff *et al.*, 2000, Jurasovic *et al.*, 2004, Akinloye *et al.* 2006).

4- Les effets du chrome (Cr) sur la santé.

4-1. Les sources du chrome

Le chrome provient d'un minerai, la chromite (FeOCr_2O_3), qui est à la base de la métallurgie et de la fabrication des briques réfractaires (NRC Canada, 1976). Le chrome existe sous plusieurs valences de -2 à 6, mais c'est surtout sous l'état trivalent ou hexavalent qu'on le trouve dans la nature. L'oxyde chromique Cr_2O_3 est utilisé comme pigment vert dans l'industrie du verre ou de la céramique, comme catalyseur, comme abrasif ou pour la fabrication de réfractaires. Certains sels sont utilisés dans le tannage des cuirs, le mordantage des textiles. Les dérivés du Cr (VI) sont utilisés dans le tannage des peaux, en gravure, en photographie. Le trioxyde CrO_3 est très employé dans le chromage électrolytique, dans la préservation des bois et comme inhibiteur de corrosion. Les chromates (CrO_4^{2-}) solubles de sodium, potassium sont des mordants en teinturerie pour les textiles naturels et artificiels. Les bichromates ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) de sodium et potassium, également hydrosolubles, sont les bases de la chimie du chrome. La fabrication des chromates et bichromates expose à des teneurs importantes en Cr (VI). Les chromates peu solubles (de plomb, calcium, strontium, baryum, zinc) sont utilisés comme pigments pour peintures, encres et en pyrotechnie (IARC, 1990).

Les eaux résiduaires chromifères de l'industrie et les eaux des circuits de refroidissement contenant des chromates inhibiteurs de corrosion peuvent contaminer les eaux naturelles. C'est la teneur en chrome total dissous qui est le paramètre le plus mesuré lors des analyses des oligoéléments présents dans les eaux superficielles et souterraines. Dans les eaux lacustres naturelles, le Cr (III) se transforme très lentement en Cr (VI). Dans l'eau potable chlorée, le chrome est habituellement présent sous son état hexavalent (Schroeder et Lee, 1975).

4-2. Les besoins essentiels de l'homme en chrome

Seuls les chromes trivalent et hexavalent semblent jouer un rôle dans les milieux biologiques (Mertz, 1969) et seul le chrome trivalent apparaît comme un oligo-élément indispensable (Levander, 1975). Il est nécessaire pour la synthèse des corps gras à partir du glucose et aussi pour l'oxydation des graisses en gaz carbonique. On croit que la forme biologiquement active de ce métal est un complexe acide nicotinique – acide aminé (glycine, acide glutamique et cystéine) – chrome trivalent, qui agit comme un activateur de l'insuline, probablement grâce à la formation d'un complexe entre les groupes sulfhydryles de la

membrane cellulaire et ceux de la chaîne A de l'insuline (Mertz, 1974). Ce complexe, qui est présent dans divers aliments, est appelé "facteur de tolérance au glucose". Le principal effet biochimique d'une carence en chrome est une réduction de la sensibilité à l'insuline exogène ou endogène (Mertz, 1974).

Le U.S. Food and Nutrition Board (1980) a fixé entre 0,05 à 0,2 mg/jour la quantité de chrome nécessaire au maintien d'une bonne santé physique.

4-3. L'absorption, la distribution et l'excrétion du chrome.

➤ L'absorption, la distribution et le métabolisme du Cr :

Certaines données indiquent que de 2 à 10 % environ du chrome hexavalent et de 0,1 à 3 % du chrome trivalent inorganique ingérés sont absorbés (OMS, 1984 ; U.S. EPA 1985). Le suc gastrique inhibe l'absorption du chrome trivalent et hexavalent inorganiques et réduit partiellement l'état hexavalent à l'état trivalent (Donaldson, 1966). Sous forme de facteur de tolérance au glucose (organique), le chrome est beaucoup plus facilement absorbé qu'à l'état non organique. On croit qu'au moins 10 à 25 % du chrome organique ingéré sont absorbés par la voie intestinale, probablement au niveau du jéjunum ou de la partie supérieure de l'iléon (Schroeder *et al.* 1970; Mautner *et al.* 1974 ; Gibson *et al.* 1984). L'absorption intestinale du chrome pendant la petite enfance est plus rapide qu'à l'âge adulte (Saner *et al.* 1976). Ce problème est illustré dans un document publié par l'Organisation mondiale de la santé, selon lequel 10 % du chrome ingéré seraient absorbés (Friber *et al.*, 1979 ; OMS, 1984).

On a estimé que le pourcentage de la dose de chrome inorganique transmis au fœtus allait de 0 à 12 % dans le cas du chrome hexavalent et se situait à 0,4 % dans celui du chrome trivalent (Danielsson *et al.*, 1982). Par contre, de 20 à 50 % du chrome administré sous forme de facteur de tolérance au glucose ont été retrouvés dans les portées (Majone *et al.*, 1979). Ce fait semble confirmer le rôle d'oligo-élément indispensable assumé par le chrome (O'Heany, 1986). Il semble exister un mécanisme d'homéostasie, s'appuyant sur les fonctions de transit hépatique ou intestinal, qui empêche toute accumulation excessive de chrome trivalent (Schroeder *et al.*, 1962). Chez l'homme, les concentrations les plus importantes de chrome se trouvent dans la peau, les muscles et la graisse; la plus élevée se situe dans les poumons. Le contenu total moyen du corps en chrome est d'environ 6 mg (Gibson *et al.*, 1984) mais les concentrations observées dans les tissus varient selon le sexe, l'âge et l'endroit où habite le sujet (Schroeder *et al.*, 1970).

Sur le plan métabolique, les dérivés du chrome sont absorbés par voie pulmonaire avec une clairance décroissante des dérivés hexavalents solubles, aux dérivés hexavalents

insolubles et aux dérivés trivalents. Il en est de même au niveau cutané et digestif. Le Cr (VI) pénètre dans les cellules où il peut être réduit en Cr (III) avec formation d'espèces intermédiaires. Le mécanisme d'action du Cr (VI) réside dans sa métabolisation, c'est-à-dire la formation d'espèces Cr (V), Cr (IV) et Cr (III). Ces réductions nécessitent du glutathion, du NADH et du NADPH (Connett et Wetterhahn, 1983 ; Wiegand et coll., 1984), mais des protéines à groupement thiol, la cystéine ou l'eau oxygénée peuvent jouer ce rôle redox (Kawanishi et coll., 1986 ; Shi et Dalal, 1990).

Au cours de la réduction du Cr (VI), des espèces réactives de l'oxygène et du soufre se forment. Si ces mécanismes surviennent au niveau extracellulaire et même intracellulaire à distance des sites cibles, on a une réaction de détoxification, mais s'ils se produisent à proximité du noyau, il s'agit d'un processus toxique et cancérigène (de Flora et Wetterhahn, 1990).

➤ **L'excrétion du chrome :**

Au moins 80 % du chrome excrété est éliminé dans l'urine, et le reste dans les fèces. On croit qu'une excrétion moyenne de 0,0084 mg pour 24 heures, dans une plage de 0,002 à 0,021 mg, est représentative, bien qu'une estimation récente situe la moyenne à moins de 0,001 mg (Armstrong *et al.*, 1981). Une excrétion très importante de chrome semble survenir chez certains diabétiques insulinodépendants (O'Heany, 1986).

4-4. Les effets toxiques du chrome.

Les effets toxiques connus du chrome chez l'homme sont attribuables surtout au chrome hexavalent. Une seule dose orale de 10 mg de chrome hexavalent par kilogramme de poids corporel entraîne, chez l'homme, une nécrose du foie, une néphrite et la mort. Une dose plus faible produit une irritation et une ulcération de la muqueuse gastro-intestinale et, occasionnellement, une encéphalite ainsi qu'un grossissement du foie (Davids *et al.*, 1951).

On n'a recueilli aucune preuve de malformations congénitales (teratogénicité) ou de stérilité causées par l'exposition aux composés du chrome (O'Heany, 1986). Les effets cancérigène et mutagène du chrome sont les suivants :

• **Pouvoir cancérigène**

Le chrome hexavalent peut inhiber l'activité enzymatique de la benzopyrène-hydroxylase. On a déjà soutenu que des composés capables d'une telle inhibition ont un pouvoir cancérigène (Chrétien *et al.*, 1974).

Chez l'homme, l'exposition à des sels de chrome hexavalent pendant des périodes allant de 2 à 26 ans serait une cause de cancer de l'appareil digestif. Des concentrations

élevées de chrome (et de zinc) dans le sol ont été reliées à de fortes incidences régionales de cancer de l'estomac (Stocks, 1972). On croit que le chromate de plomb a causé la mort par le cancer de cinq sujets exposés à une intoxication au travail (Finklea, 1976). En utilisant des données sur l'exposition au chrome par inhalation, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé "le chrome et certains composés du chrome" dans le Groupe I: preuves suffisantes de leur pouvoir cancérigène chez l'homme et les animaux (CIRC, 1982). Cependant, selon un rapport récent de l'U.S. Environmental Protection Agency, il n'existe pas suffisamment de données pour conclure que l'ingestion de chrome a un effet cancérigène (U.S. EPA, 1985).

- **Pouvoir mutagène**

Le chrome hexavalent traverse facilement la membrane cellulaire, en partie par transport actif; dès qu'il est à l'intérieur de la cellule, il est partiellement réduit à l'état trivalent, qui produit des effets toxiques pour le génome (Bianchi *et al.*, 1985). De même peut-il y constituer des complexes étroitement liés à l'ADN, ce qui explique son potentiel mutagène (U.S. EPA, 1985). Les composés des chromes trivalent et hexavalent favorisent l'incorporation de nucléotides non complémentaires dans l'ADN, le chrome hexavalent étant actif à des doses plus faibles (Raffeto *et al.*, 1977 ; Majone *et al.*, 1979)

4-5. Influence des techniques de traitement des eaux sur la toxicité du chrome.

La chloration de l'eau avant traitement tend à oxyder tout le chrome trivalent en chrome hexavalent, et à réduire ainsi l'efficacité des méthodes d'élimination du chrome trivalent (U.S. EPA, 1977). Comme de nombreux réseaux de distribution d'eau potable n'ont aucun problème de contamination par le chrome, on n'a réalisé que peu d'études sur l'efficacité de l'élimination du chrome par les traitements habituels. La plupart des données recueillies proviennent d'études en laboratoire ou en usine pilote (McDonald, 1985).

Il a été établi que la coagulation à l'alun ou par le sulfate ferrique et l'adoucissement à la chaux peuvent éliminer au moins 90 % d'une concentration initiale de chrome trivalent de 0,15 mg/L. L'efficacité de la coagulation par le sulfate ferrique est indépendante d'un pH fixé entre 6,5 et 9,3. La coagulation à l'alun présente une efficacité maximale pour une plage de pH de 7,5 à 8,5 ; mais elle ne réussit à éliminer qu'environ 80 % du chrome lorsque le pH atteint 9,2. Avec l'adoucissement à la chaux, la coagulation la plus forte est obtenue avec un pH supérieur à 10,5; la quantité de chrome éliminée diminue jusqu'à environ 70 à 80 % lorsque le pH atteint 9,5. Dans le cas de concentration de chrome initiale de 10 mg/L, les trois méthodes permettent de les réduire dans une proportion de 98 % (U.S. EPA, 1977). Aucune

des trois méthodes n'élimine efficacement le chrome hexavalent. C'est la coagulation par le sulfate ferrique qui est la meilleure, car elle permet d'éliminer 35 % du chrome hexavalent lorsque le pH est de 5,5. Ni la coagulation à l'alun, ni l'adoucissement à la chaux ne réussissent à éliminer plus de 10 % du chrome.

Afin de minimiser la teneur en métaux lourds, dans l'eau potable issue des fleuves et du lac Tchad, dans le cas d'une distribution industrielle, voici les techniques de traitement proposées :

Tableau 2: les techniques de traitement des eaux contenant les métaux lourds.

	Mercure	Argent	Plomb	Cuivre	Zinc	Nickel	Chrome	Cadmium	Cobalt	Vanadium
Pré-chloration	Améliore l'élimination de tous les métaux lourds									
Coagulation	*	***	***	***	**	**	-		-	*
Filtres à sable	***	***	***	***	***		-	***	-	
Échangeurs d'ions	**	**	***	**	**		***	***	**	**
Charbon actif	***	***	**	**	**	**	**	**	**	**

- : Pas d'effet / * : Peu d'effet / ** : Suffisant pour répondre aux normes en vigueur / *** : Excellent

Source : Degrémont Sixth Edition

En conclusion, Les données sur les effets toxiques du chrome hexavalent proviennent presque toutes de l'exposition au lieu de travail, les lésions les plus importantes apparaissent sur la peau et dans l'appareil respiratoire. A la concentration maximale acceptable actuellement pour l'eau potable (0,05 mg/L), le chrome hexavalent ne paraît pas produire d'effets nocifs sur la santé de l'homme ou celle des animaux. Les données disponibles ne permettent pas de déterminer si des concentrations plus élevées seraient également inoffensives (NRCC, 1976).

D- Généralités sur le Tchad et le Lac Tchad

1-Généralités sur le Tchad

La République du Tchad est un Etat enclavé de l'Afrique sahélienne, situé entre les 7° et 24° de latitude N et entre les 13° et 24° de longitude E. Il est limité au nord par la Libye

(frontière de 1055 km), à l'ouest par le Niger (1175 km) et le Nigeria (89 km) sur le Lac Tchad), au sud par le Cameroun (800 km) et la Centrafrique (1197 km) et à l'est par le Soudan (1360 km). Le Tchad a une superficie de 1 284 000 km². Le Tchad fait partie de l'Afrique Centrale et de la zone CEMAC (Les Guides Ecofinance, 2006).

1-1. Géographie physique

Malgré l'immensité de son territoire, le Tchad peut se résumer à une vaste cuvette, dont le fond serait occupé par l'erg du Djourab (193 m), ou fut découvert l'hominidé Toumaï en 2001, le lac Tchad (250 m), et les monts du Guéra (1513 m). Délimitée au nord et à l'est par les massifs du Tibesti (Emi Koussi 3410 m) et de l'Ennedi, elle se relève également vers le sud pour rejoindre la dorsale tchadienne qui prolonge l'Adamaoua (monts de Lam à 1160m).

Au Tchad, se succèdent deux saisons dans l'année : la saison sèche qui va de novembre à avril, et la saison pluvieuse de mai à octobre. En fonction des pluies, inégalement réparties, on distingue trois zones climatiques :

- une zone désertique, avec moins de 250 mm de précipitations annuelles (25 mm à Faya-Largeau) sur 780 000 km² ;
- une zone sahélienne au centre (200 à 500 mm de pluie, de juin à septembre) de 374 000 km² ;
- enfin une zone tropicale semi-humide de 130 000 km² au sud avec plus de 500 mm d'eau (jusqu'à 1200 mm à Sarh entre avril et octobre) (Les Guides Ecofinance, 2006).

1.2. Population et développement humain

Le Tchad comptait 9,7 millions d'habitants en 2006, d'après les projections faites à partir du Recensement Général de la Population et de l'Habitat du Tchad (RGPHT, 1993). La population, qui était de 6,27 millions d'habitants en 1993 dont 48,4 % d'hommes et 51,6 % de femmes, devrait atteindre 17 millions en 2025. 50 % des tchadiens ont moins de 15 ans, 4 % seulement plus de 60 ans. L'âge médian est de 14 ans. L'espérance de vie est de 50,3 ans (contre une moyenne africaine de 51 ans) (Les Guides Ecofinance, 2006). Elle est de 47 ans pour les hommes et de 54,5 ans pour les femmes. Le taux de natalité est de 4,5 %. Le taux d'accroissement moyen annuel de la population est de 2,5 % par an et le taux brut de mortalité de 16,3 ‰ (Annuaire des statistiques sanitaires du Tchad, 2003). Les langues officielles sont le français et l'arabe classique. La population urbaine, en 2005, représentait 24,3 % de la population totale (Les Guides Ecofinance, 2006).

Le Tchad fait partie des pays les plus pauvres du monde avec un PIB estimé à 350 dollars US par habitant (133^e sur 177 pays) et par an en 2006 hors pétrole, (il est de 826

dollars pétrole inclus). Les classements du PNUD pour 2006 s'appuient sur les chiffres de 2004 qui prenaient en compte le début de la production pétrolière (juillet 2003). Son indice de développement humain (IDH) le situe au 171^e rang sur 177 (Les Guides Ecofinance, 2006). Au vu de l'Enquête sur la Consommation et le Secteur Informel (ECOSIT), réalisée en 1995, plus de 52 % de la population vit en dessous du seuil de pauvreté, avec moins d'un \$ US par personne et par jour (Annuaire des statistiques sanitaires du Tchad, 2003).

1.3. L'alimentation

Un tiers de la population souffre de malnutrition. Les céréales occupent une place prépondérante dans l'alimentation des tchadiens, puis viennent les légumineuses et les tubercules. L'oseille, le gombo et l'oignon sont très répandus également, ainsi que les oléagineux (sésame, arachide). La pratique de l'allaitement maternel est très répandue dans le pays (98 % des enfants) (Les Guides Ecofinance, 2006).

1-4. La pêche

Le poisson est une denrée de première nécessité dont particulièrement les espèces : carpe, capitaine et silure (Les Guides Ecofinance, 2006). Toujours, selon le même document, la pêche est pratiquée dans de nombreux plans d'eau du pays : le Lac Tchad, le système Logone-Chari, les lacs intérieurs et les plaines inondées. La pisciculture est entrée dans les mœurs depuis 1970 (Les Guides Ecofinance, 2006).

1-5. L'eau et la santé

La grande partie de la population tchadienne s'approvisionne en eau à partir des puits traditionnels à ciel ouvert exposés aux pollutions de tout genre (Annuaire des statistiques sanitaires du Tchad, 2003). A cela s'ajoutent les conditions précaires d'hygiène. Selon l'enquête sur les indicateurs multiples au Tchad (EIMT, 2000) la grande partie (71,3 %) de la population ne disposent pas de toilettes. Seulement 24,6 % possède un système d'évacuation adéquat des excréments dont 0,2 % avec un WC moderne. Aucune ville ne dispose d'un système intégré d'évacuation des eaux usées. Les réseaux de collecte sont vétustes. Il n'existe par ailleurs aucun système structuré d'évacuation des ordures ménagères et de traitement des déchets solides, ce qui confronte les centres urbains à de sérieux problèmes d'assainissement (Les Guides Ecofinance, 2006).

Selon le *Profil National du Tchad sur la gestion des produits chimiques*, du Ministère de l'Environnement et de l'Eau (MEE, 2005), les principaux indicateurs de santé sont les suivants :

- taux de mortalité infantile : 102 pour 1000 en 2004 ;
- couverture vaccinale : 11 % ;
- taux de mortalité maternelle : 1099 pour 100 000 naissances vivantes ;
- Etat nutritionnel des enfants malnutris 23 % ; sévèrement malnutris 43 %.

D'après l'annuaire des statistiques sanitaires du Tchad (2003), parmi les 22 maladies prioritaires sous surveillance au Tchad, cinq sont dominants conformément au tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3. Cinq premiers motifs de consultation dans les centres de santé en 2003

N° d'ordre	Motifs de consultation	Pourcentage
1	Paludisme	26,79
2	Infection des voies respiratoires inférieures	9,01
3	Diarrhées	6,43
4	Dysenterie	3,04
5	Conjonctivites	2,15

Les dépenses publiques de santé représentaient, en 2003, 10,5 % du total des dépenses de l'Etat (Les Guides Ecofinance, 2006).

1-6. L'Education.

L'insuffisance de formation scolaire et professionnelle des Tchadiens est un handicap sérieux pour l'économie nationale, auquel remédie partiellement la présence de nombreux immigrés, béninois, camerounais ou nigériens. Ce problème a été quelque peu atténué dans le cadre du projet pétrolier où des formations professionnelles ont été assurées avec l'appui des compagnies pétrolières (Les Guides Ecofinance, 2006).

En avril 2000, le gouvernement tchadien a initié la préparation d'une Stratégie Nationale de réduction de la pauvreté (SNRP). La SNRP présente une vision intégrée des politiques économiques et sociales du pays et se propose de réduire la pauvreté de 50 % d'ici à 2015. Cette stratégie est fondée sur la réalisation de cinq objectifs prioritaires : une bonne gouvernance, une croissance soutenue, le développement du capital humain, l'amélioration des conditions de vie des populations les plus vulnérables et la protection de l'environnement (Les Guides Ecofinance, 2006).

Le taux d'analphabétisme atteint, au total, 67 %. Il est de 56 % chez les hommes et de 78 % chez les femmes. L'éducation fait partie des priorités du budget de l'Etat. En 2002, la part consacrée à l'enseignement était de 21 % pour le fonctionnement (soit 26 milliards de FCFA)

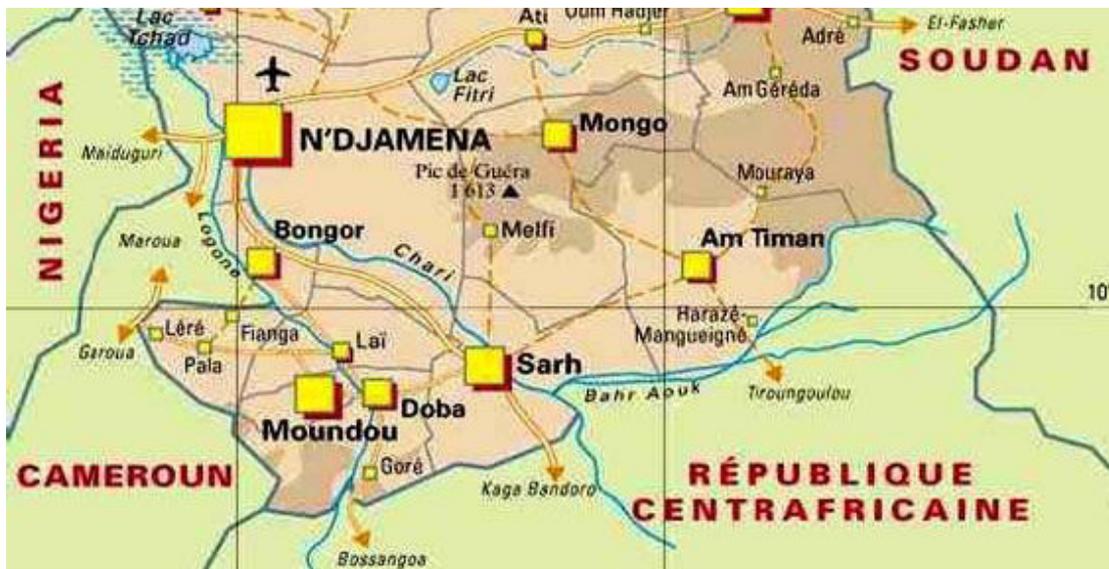
et de 6 % pour l'équipement (13,5 milliards de FCFA). Depuis la mise en œuvre de la stratégie Education-Formation-Emploi (EFE) en 1990, le système éducatif tchadien a connu des progrès sur le plan quantitatif. Le taux brut de scolarisation dans le primaire est passé de 75 % en 2000 à 88 % en 2003 (71 % selon l'UNESCO) (Les Guides Ecofinance, 2006).

Le ratio élève-maitre (90 % des enseignants du primaire sont des hommes) était de 70 en 2004 (Les Guides Ecofinance, 2006).

Dans le secondaire, on note une forte croissance des effectifs, passés de 45 000 élèves en 1988 à 139 000 en 1999, pour 4000 enseignants (dont 95 % d'hommes). En 2000, le taux de scolarisation des filles atteignait 23 %.

Dans le supérieur, sur 1500 étudiants admis en première année, la moitié obtient une licence, environ 400 décrochent la maîtrise. En faculté de médecine, où les étudiants sont recrutés sur concours, le taux de réussite au diplôme après huit années d'études est de 80 %. Cette faculté forme, en moyenne, une quarantaine de médecins par an, qui sont immédiatement intégrés et affectés en milieu hospitalier public. L'institut universitaire des sciences et techniques d'Abéché (IUSTA) et l'école nationale des agents de santé et sociaux (ENASS) de N'Djaména forment les paramédicaux (Les Guides Ecofinance, 2006).

2. Le Tchad et son hydrologie



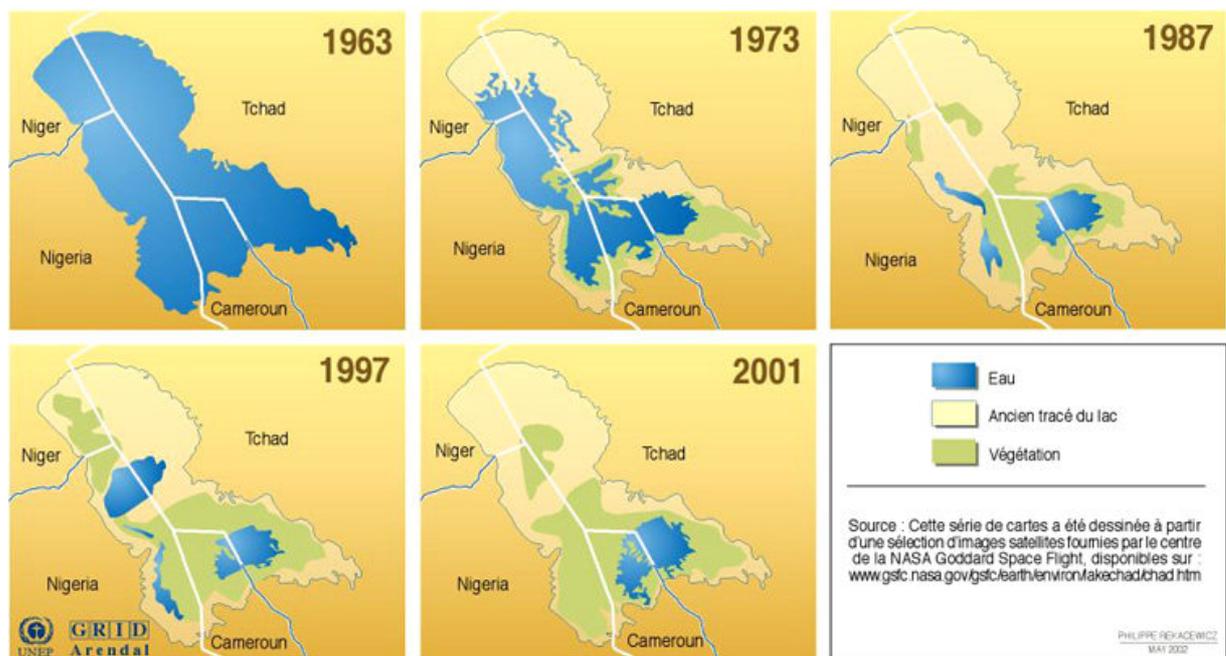
Source : Alain Merle, 2007.

Les fleuves, le Chari (1200 km) et son affluent, le Logone (970 km), prennent respectivement leur source en Centrafrique et au Cameroun. Ils se rejoignent à N'Djaména (débit moyen de 700 m³/s) avant de se jeter dans le Lac Tchad, qu'ils alimentent à plus de 90

% . En territoire tchadien, le Logone reçoit les eaux des rivières : le Lim, la Pendé et la Nya. Le système Chari-Logone présente un apport moyen annuel de l'ordre de 32 milliards de m³. Vaste mais peu profond, le Lac Tchad couvre les besoins en eau de 20 millions de personnes au Tchad, au Cameroun, au Niger et au Nigeria.

Jadis l'un des plus grands lacs du monde (1 million de km² en 4000 avant J.-C. avec une profondeur de 65 m), sa surface s'est considérablement réduite depuis 1960, date à laquelle elle était encore de 26 000 km², avec un volume d'eau de plus de 100 milliards de m³. En 2000, elle ne couvrait plus que 1500 km², avec une profondeur maximale de sept mètres (Les Guides Ecofinance, 2006). L'eau du Lac Tchad s'est évaporée en raison des sécheresses de 1972-1973 et 1982-1984, des cultures irriguées, comme le riz et la déforestation. Le projet énergétique le plus en vue au Tchad est, sans conteste, le Programme National Gaz visant à remplacer, à terme, le charbon de bois. Au moment de son lancement en 2000, la consommation mensuelle de gaz des Tchadiens était de 5 tonnes. En 2007, elle s'est établie à 40 tonnes mensuelles, ce qui est un énorme progrès (Merle *et al.*, 2007). La forte diminution du plan d'eau a entraîné l'apparition de deux cuvettes ; Sud et Nord (images NASA 2002). Actuellement, le volume d'eau du Lac n'est que de 13,5 milliards de m³ (MEE, 2005). Le Lac Tchad offre ainsi l'exemple le plus spectaculaire des conséquences des changements climatiques en Afrique tropicale, dans le contexte actuel de réchauffement climatique global (MEE, 2005).

Disparition du lac Tchad en Afrique



Source : images NASA, 2002.

3. Les problèmes environnementaux au Tchad

Depuis les années 1970, l'environnement tchadien est menacé, notamment par :

- la sécheresse qui affecte tout le sahel ;
- le déboisement (agriculture extensive et usage de la biomasse comme source d'énergie) ;
- le surpâturage ;
- la dégradation des sols par l'augmentation de l'érosion éolienne et hydrique ;
- la diminution de volume d'eaux de surface et des ressources halieutiques ;
- l'assèchement des nappes phréatiques et,
- l'exploitation abusive et anarchique des ressources naturelles.

Des menaces sur l'environnement se font également jour dans la zone pétrolière (Les Guides Ecofinance, 2006).

D'après le document du gouvernement tchadien, intitulé : *Profil National du Tchad sur la gestion des produits chimiques*, du ministère de l'Environnement et de l'Eau (MEE, 2005), réalisé en collaboration avec l'Institut des Nations Unies pour la Formation et la Recherche (UNITAR), nous lisons : Le paysage économique du Tchad est caractérisé par une industrie à l'état embryonnaire. L'industrie chimique à proprement parler est inexistante. L'exploitation du pétrole est réduite à l'exportation du brut. Mais le Tchad importe beaucoup de produits chimiques à usage agricole, sanitaire et domestique. L'utilisation de ces produits n'est pas sans conséquence sur la santé humaine et sur l'environnement. Le cas des polluants organiques persistants (POPs), recensés au Tchad, est la démonstration du danger que présentent les produits chimiques. Parmi ces POPs, les substances classées dangereuses sont au nombre de 12 dont 9 pesticides, les dioxines, les furannes et les polychlorobiphényles (PCB).

Dans chaque ville, les industriels rejettent des effluents liquides, soit directement dans le milieu naturel, soit dans les cas les plus favorables avec des bassins de décantation intermédiaire avant le rejet (Merle *et al.*, 2007). Il importe donc, selon le même auteur, de connaître la liste des différentes industries existantes. Il s'agit de :

- les imprimeries à N'djaména ;
- les abattoirs à N'djaména ;
- les centrales thermiques à N'djaména, Moundou, Sarh ;
- les brasseries, sucreries et fabricants d'eau minérale à N'djaména et à Moundou ;
- la fabrication d'huile de coton à Moundou ;
- la fabrication de savon à partir d'huile de coton, à Moundou ;

- les usines de coton à Moundou, Sarh, Koumra ;
- la fabrication des tissus à partir du coton à Sarh ;
- la fabrication de sucre et bonbons à Sarh et à N'djaména ;
- la production de pétrole à Doba et transport de pétrole brut par un oléoduc jusqu'à Kribi ;
- les zones de construction mécanique et de démolitions mécaniques (Merle *et al.*, 2007).

En conséquence, ces rejets plus ou moins contrôlés contribuent :

- à l'eutrophisation des cours d'eau, à cause d'une part de la présence des phosphates, et aussi d'un excès de matières organiques ;
- à des atteintes à la santé (diarrhée, problèmes rénaux, affections articulaires, syndrome de fatigue chronique) à cause de la présence de métaux lourds (Davydova, 2005, Okwonko *et al.*, 2005, Cavaco *et al.*, 2007, Asonye *et al.*, 2007).

Merle *et al.*, (2007), ont établi la liste des différentes industries existantes au Tchad, et ont fait des liaisons, usine-type de pollution (tableau en annexe 1). Il ressort de ce tableau, que les usines, sources des métaux lourds sont les suivantes : Imprimerie du Tchad (IDT), les centrales thermiques (STEE), fabrication de tissus à partir du coton (STT) et la production de pétrole brut de Doba. Le tableau 4 ci-dessous nous précise les métaux lourds présents dans l'environnement, issus de différentes sources industrielles et agricoles :

Tableau 4: Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement

Utilisations	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni,
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides, conservateurs)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et	Sn, Hg

cosmétiques		
Textiles		Cr, Fe, Al
Raffineries		Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants		Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

Source : Biney *et al.*, 1995.

Quant au tableau en annexe 2, il nous donne un aperçu des secteurs industriels et agricoles du Tchad, et le poids de chacun dans l'économie nationale.

Pour gérer rationnellement et minimiser la pollution des eaux, il faut arriver à identifier tout ce qui concerne les apports (charges), la distribution et le sort des contaminants. Il faut en particulier estimer les quantités, identifier les itinéraires qu'ils empruntent quand ils se dispersent, connaître leur destinée et évaluer leur effet sur le biote (Biney et al., 1995).

Le tableau en annexe 3 nous informe sur l'utilisation des produits chimiques au Tchad, en quantité, par secteur d'activité en 2004. Il s'agit d'un document du gouvernement tchadien, réalisé en 2005. Elle nous renseigne de façon plus précise, sur les sources possibles des métaux lourds recherchés ; sachant que les pesticides, sous forme de fongicides contiennent des métaux lourds et que les engrais phosphatés contiennent le plus souvent des traces de cadmium. Un bon nombre de ces produits chimiques à usage agricole et domestique, selon le même document, sont détournés de leur utilisation indiquée pour servir à la pêche et à la chasse par empoisonnement. Beaucoup de cas d'intoxications sont observés dans les milieux ruraux à cause de la mauvaise utilisation de ces produits ou par ignorance du danger que représentent ces produits. Il y a lieu de déplorer l'absence de centres anti-poison et de laboratoires d'analyses et de certification des produits chimiques importés. Cette situation est d'autant plus inquiétante pour le consommateur Tchadien, qui se trouve à la merci des producteurs qui peuvent lui proposer tout genre de produits même les plus douteux. Par ailleurs, l'importation des pesticides se fait de manière informelle. Le circuit de commercialisation est si complexe qu'il est difficile de connaître exactement les quantités importées et utilisées au Tchad (MEE, 2005).

E- Le choix des poissons et leur description

1- Les espèces de poissons capturées au Lac Tchad

1-1-L'importance de la pêche au Lac Tchad

La pêche dans les eaux intérieures constitue une source de nourriture et d'emploi pour de millions d'individus en Afrique intertropicale, trois millions de personnes dans les seuls pays sahéliens (Bronzon et Breuil, 1992).

Au Tchad, la pêche représente 10 % du PIB (Actes du séminaire national sur la pêche au Tchad, 1994). Selon les données de la FAO, la production de poisson dans les eaux intérieures du Tchad, de 1965 à 1993 (en tonnes), se chiffre de la façon suivante :

Tableau 5 : La production de poisson dans les eaux intérieures du Tchad, de 1965 à 1993 (en tonnes).

Années	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1993
Production	66 000	70 000	75 000	60 000	55 000	60 000	80 000

Source: FAOSTAT Data base Result, N° 343 Records.1997.

Dans le Bassin conventionnel du Lac Tchad, la pêche constitue une importante ressource renouvelable. Son rendement est estimé à environ 100 000 tonnes de poisson/an, avec un potentiel de plus de 200 000 tonnes annuel dans les conditions de bonne pluviosité. Outre plusieurs dizaines de milliers de pêcheurs artisans, le processus de transformation, de commercialisation et de transport assure la subsistance de plus de 150 000 personnes (Bronzon et Moschett, 1990).

La production de poissons au Lac Tchad, de 1969 à 1981 a été la suivante (en tonnes) :

Tableau 6 : La production de poissons au Lac Tchad, de 1969 à 1981 (en tonnes) :

Années	1969	1973	1981
Production	29 000	220 000	21 000

Source : Oualbadet (1997).

Le même auteur, souligne que les fluctuations de production suivent ainsi les changements de la superficie du lac consécutive aux périodes de sécheresse survenue dans la région. Le renouvellement des stocks de poissons, est soumis à l'influence de nombreux facteurs environnementaux (anthropiques et naturels). En plus des prélèvements dus à l'effort de pêche, les niveaux de crue, la température, la salinité et le niveau de pollution de l'eau constituent autant de facteurs qui entrent en jeu pour conditionner l'abondance des poissons. En l'état actuel des connaissances, il est malheureusement très difficile de déterminer avec exactitude la part de dégât dû à chacun de ces facteurs. Toutefois, l'on s'accorde à reconnaître que le mode de gestion appliqué à une pêcherie est très déterminant pour la pérennité de la ressource (Oualbadet, 1997).

Pour le facteur prélèvement, Durand (1983), souligne que, de 1963 à 1969, l'effort de pêche au Lac Tchad serait multiplié par 20. Quant au facteur pollution, les pollutions les plus dangereuses sont dûes aux biocides souvent utilisés à doses massives soit pour augmenter le rendement des plantations, soit pour lutter contre les vecteurs de grandes endémies, soit pour

s'opposer à l'extension de fléaux naturels tels que les sauterelles ou les mange-mil (Comte, 1982)

Au Tchad, Daget *et al.* (1988), soulignent qu'en 1955, un essai d'éradication des larves de simulies (moustiques vecteur de l'onchocercose) dans le Mayo Kebbi par épandage du lindane (HCH) par hélicoptère s'est soldé par une destruction massive des poissons ; ces derniers étant en effet très sensibles aux doses nécessaires pour obtenir un effet larvicide.

1-2-Les espèces de poissons capturées au lac Tchad

La production biologique des Yaérés-bas-chari-Lac Tchad, vaste zone de prairies marécageuses inondées lors de la crue du Chari et du Logone, est enrichie par l'entrée, dans le cycle biologique des eaux, de la matière végétale des peuplements végétaux hygrophiles occupant les zones atteintes par la crue. Interviennent également les apports organiques et minéraux d'origine animale : déjections des troupeaux occupant cette région en saison sèche ou animaux terrestres (vers, insectes, reptiles, etc.) noyés par la crue. C'est donc une zone riche sur le plan nutritionnel et la densité de la végétation herbacée en fait un immense abri pratiquement impénétrable aux prédateurs de grande taille. *Mormorydés*, *Alestes*, *Labeo* et *Distichodus* sont les espèces les plus capturées. Les *Siluridés* et les *Mochocidés* sont les espèces capturées dans les mares résiduelles (Iltis, 1975).

Toujours, selon le même auteur, d'après l'estimation faite en 1973, les captures faites dans le fleuve entre N'Djaména et le Lac Tchad, s'élèveraient annuellement à 20 000 tonnes de poissons. Les espèces les plus pêchées sont les *Lates niloticus* (capitaine), les *Hydrocyons* (Binga), les *Citharinidés* (Doro), les *Heterotis* (Ngolo), les *Tilapia* (carpes) et les *Alestes* (salanga). La pêche au Lac Tchad est pratiquée en toutes saisons.

C'est en fonction de ces travaux antérieurs que nous avons choisi les trois espèces, à savoir le capitaine (*Lates niloticus*), les carpes (*Tilapia nilotica*) et les machoirons (*Arius latiscutatus*) dont voici ci-dessous les photos que nous avons prises en Novembre 2008 et leurs descriptions.

2. Description des espèces choisies pour notre étude.

2-1. Le capitaine (*Lates niloticus* L.)

Le *Lates niloticus* (Linnaeus, 1758), appelé encore Perche du Nil, est largement répandue, dans la région Ethiopienne d'Afrique, et communément dans les fleuves majeurs, incluant les bassins du Nil, du Tchad, du Niger, du Sénégal et des Volta. C'est un poisson commun du Lac Victoria où il a été introduit en 1962 (Hopson, 1972). Il habite les eaux

douces et chaudes tropicales (27°N - 7°S), de profondeur 10-60 m (Fishbase, 2004), et se nourrit de poissons, insectes, crustacées et mollusques.



Source : Photographie TCHIKOUA R., 2008.

Photo 1 : *Lates niloticus*

2-2. Le machoiron (*Arius latiscutatus*)

Arius latiscutatus (Gunther, 1864), fait partie de

Siluriformes. Il se nourrit de poissons, de zooplancton et de détrit (Diouf, 1996).



Source : Photographie KAYALTO B., 2008.

Photo 2 : *Arius latiscutatus*

2-3. Les carpes (*Tilapia nilotica*).

Tilapia nilotica (L., 1758) fait partie, comme tous les autres tilapias de la famille des Cichlidae, ordre des Perciformes. Ce genre rassemble actuellement plus de 90 espèces. Les principaux synonymes de cette espèce, que l'on peut trouver dans la littérature récente, sont:

- *Oreochromis (Oreochromis) niloticus*

Règne : Animalia
 Embranchement : Chordata
 Sous-embranchement : Vertebrata
 Superclasse : Osteichthyes
 Classe : Actinopterygii
 Sous-classe : Neopterygii
 Infra-classe : Teleostei
 Super-ordre : Acantopterygii
 Ordre : Perciformes
 Sous-ordre : Percoidei
 Famille : Latidae
 Genre : *Lates*
 Espèce : *Lates niloticus*
Source : FishBase, 2004.

Arius latiscutatus (Gunther, 1864).

Règne : Animalia
 Embranchement : Chordata
 Sous-embranchement : Vertebrata
 Classe : Actinopterygii
 Ordre : Siluriformes
 Famille : Ariidae
 Genre : *Arius*
 Espèce : *latiscutatus*
Source : <http://animaldiversity.org>

- *Tilapia (Sarotherodon) nilotica*
- *Sarotherodon niloticus*

T. nilotica présente une répartition originelle strictement africaine couvrant les bassins du Nil, du Tchad, du Niger, des Volta, du Sénégal et du Jourdain ainsi que les lacs du graben est africain jusqu'au Lac Tanganyika (Philippart et Ruwet, 1982).

La température optimale de reproduction se situe entre 26 et 28°C, le minimum requis étant 22°C. Etant donné que les arcs branchiaux de *T. nilotica* disposent de branchiospines fines, longues et nombreuses et de microbranchiospines, l'eau qui y transite est véritablement filtrée de son plancton. Cette espèce est donc, en milieu naturel, essentiellement phytoplanctonophage ; ce qui ne l'empêche pas également d'absorber du zooplancton et même des sédiments riches en bactéries et Diatomées. Mais en milieu artificiel (systèmes de pisciculture) cette espèce est pratiquement omnivore (Lowe-McConnell, 1982).



Tilapia nilotica (Linnaeus, 1758).

Règne : Animalia

Embranchement : Chordata

Classe : Actinopterygii

Ordre : Perciformes

Famille : Cichlidae

Genre : *Tilapia*

Espèce : *nilotica*

Source : <http://animaldiversity.org>

Source : Photographie KAYALTO B., 2008.

Photo 3 : *Tilapia nilotica*

3. La valeur nutritive du poisson.

Dans certains Etats africains, sans accès à la mer, les pêcheries lacustres et fluviales peuvent fournir plus de 50 % de protéines animales consommées par la population, comme c'est le cas de la Zambie (Scudder et Conelly, 1985).

Le poisson représente une source précieuse de nombreux nutriments, de minéraux (calcium, phosphore, fer, cuivre, sélénium et iode), des acides gras insaturés tels que l'acide linoléique et l'acide linoléique, reconnus favorables pour la santé humaine, notamment ils préservent des maladies de la peau. Il contient des protéines de très haute qualité, les vitamines : le rétinol (vitamine A), la vitamine D et la vitamine E (Diop, 2008). Le poisson

gras est particulièrement riche en acides gras essentiels, notamment les acides gras poly-insaturés oméga-3, qui jouent un rôle très important dans la croissance et le développement du système nerveux central, surtout pendant la grossesse et la petite enfance. Ces acides gras poly-insaturés sont difficiles à obtenir d'autres sources alimentaires (Elvevol et James, 2000). La teneur en protéines dans le poisson varie entre 6 et 28%. Quant à la teneur en lipides, elle est comprise entre 0,1 et 67%. Les glucides et les minéraux y sont représentés en faible quantité. Dans le tableau 7, sont présentés en %, les principaux constituants du filet de poisson.

Tableau 7 : Principaux constituants du filet de poisson (%) (Diop, 2008).

Constituants	Composition du filet de poisson		
	Minimum	Variation normale	Maximum
Protéines	6	16-21	28
Lipides	0,1	0,2-25	67
Glucides		< 0,5	
Minéraux	0,4	1,2-1,5	1,5
Eau	28	66-81	96

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

II-1. L'échantillonnage

II-1-a. Des poissons

L'échantillonnage était fait au bord du Lac Tchad, précisément à Guité à 110 Km à l'ouest de N'Djaména. Tenant compte des travaux antérieurs (Iltis, 1975), sur les espèces de poissons les plus capturées au Lac Tchad; nous avons acheté trois espèces : les carpes (*Tilapia nilotica*), les capitanes (*Lates niloticus*) et les machoirons (*Arius laticutatus*). Ainsi donc, le 25 Novembre 2008, nous avons acheté par espèce, trois groupes de poissons de poids différents. Nos poissons étaient immédiatement mis sous glace dans de glacières. Nous avons voyagé sur Ngaoundéré, par voie terrestre. Une fois arrivés, nous nous sommes rendu immédiatement à l'ENSAI, au laboratoire de Biophysique et Biochimie Alimentaire (LABBAN), pour peser, mesurer la taille des poissons et les mettre au frais à 4°C.

II-1-b. De l'eau

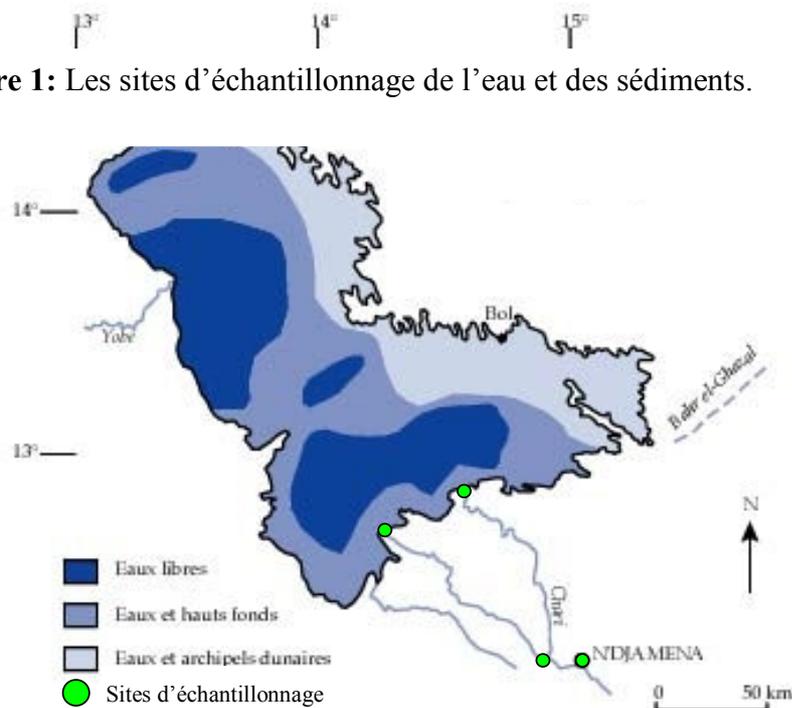
Il faudrait noter que les échantillons d'eau et de sédiments étaient tous prélevés sur les mêmes sites. Les poissons quant à eux, provenaient uniquement du Lac Tchad.

Nous avons échantillonné un litre et demie d'eau, trois fois par site, dans de bouteilles en plastique neuves. Les bouteilles étaient rincées à l'eau distillée et, avant prélèvement, rincées deux fois avec l'eau du site à échantillonner (Chale, 2002). Les prélèvements étaient fait à 25 cm en profondeur, sur les deux rives et au milieu. Au niveau du Lac Tchad, ils étaient fait aux intersections des deux bras du fleuve qui se jetaient dans le lac et à leur milieu. Les quatre sites de prélèvement étaient : N'Djaména (2 sites, Logone et Chari ; avant leur point de rencontre appelé bec du canard) ; Mani, 80 Km en aval de N'Djaména et le Lac Tchad. Chaque bouteille d'eau était acidifiée par une goutte d'acide chlorhydrique à 1% selon le protocole que nous avons utilisé (Analytical methods, Varian 1989), mise au frais, acheminée au laboratoire de l'ENSAI et conservée à 4°C

II-1-c. Des sédiments

Ils ont été prélevés sur quatre les sites à savoir : N'Djaména (2 sites), Mani à 80 Km en aval de N'Djaména et le Lac Tchad. Il faudrait noter que Hadidé est le dernier village sur terre ferme avant le lac Tchad. Nous avons prélevé presque 200g de sédiment, à la main, sur une profondeur de 0 à 5 cm, sur la rive droite, en trois endroits par site, de l'amont en aval, dans de sacs en plastique neufs. Les échantillons ont été acheminés au laboratoire, mis à sécher à la température ambiante du laboratoire.

Figure 1: Les sites d'échantillonnage de l'eau et des sédiments.



II-2. La préparation des échantillons

II-2-1. Préparation des échantillons des poissons.

II-2-1-a. Détermination de la matière sèche (MS) des poissons.

La matière sèche ou résidu sec total est l'ensemble des substances qui ne se volatilisent pas dans les conditions de dessiccation définies par la méthode utilisée. La matière sèche a été déterminée par la méthode AOAC (1990). Cette méthode est basée sur la mesure de la perte en masse des échantillons après étuvage à 105°C jusqu'à élimination complète de l'eau libre.

- Principe

L'échantillon est placé dans une étuve maintenue à 105° C jusqu'à obtention d'un poids constant, toute l'eau s'évapore et le résidu sec s'appelle matière sèche (MS).

- Méthode

Les paramètres suivants ont été déterminés avant dissection : poids et taille. Les poissons étaient écaillés. Une fois les viscères vidées, les poissons étaient disséqués ; nous avons prélevé sur chaque poisson quatre parties qui étaient: la tête et les branchies, le foie, les os de la colonne vertébrale et environ 200g de chair (un peu vers la tête, le milieu et la queue et, le tout mélangé). Chaque partie a été pesée dans un creuset en porcelaine, dont le poids à vide (P_0) a été préalablement déterminé. L'échantillon de poisson frais dans le creuset, pesé (P_1), a été placé dans une étuve réglée à 105°C pendant 24 heures jusqu'à obtention d'une masse constante. Après refroidissement dans un dessiccateur, le creuset contenant la prise

d'essai sèche a été pesé (P_2). La différence des poids nous donnait le taux d'humidité selon la formule ci-dessous :

$$\% \text{ H}_2\text{O} = ((P_1 - P_2) \times 100) / (P_1 - P_0)$$

$$\% \text{ MS} = 100 - \% \text{ H}_2\text{O}$$

P_0 creuset vide ;

P_1 creuset plus échantillon frais ;

P_2 creuset plus prise d'essai sèche.

II-2-1-b. Détermination de la teneur en cendres totales pour 100 g de matière sèche.

Les cendres totales ont été quantifiées selon la méthode décrite dans AFNOR (1981). Les cendres représentent les résidus inorganiques obtenus après calcination de la matière organique (Bell, 1981). Elles sont de couleur blanche et donnent une idée sur la quantité d'éléments minéraux présents dans l'aliment.

- Principe

Lorsqu'une masse m de la poudre est soumise à incinération à 550°C, la matière organique était consommée et la matière résiduelle (cendres blanches) est minérale.

- Méthode

Après détermination du taux de matière sèche, nous avons écrasé dans le mortier en porcelaine, les différentes parties séchées de nos poissons et conservé les poudres dans de sachets en plastique étanches. Cinq (5) à sept (7) grammes de poudre de chaque échantillon, selon l'importance de la quantité de l'échantillon, a été pesé, en deux (2) répétitions, dans des creusets en porcelaine et remis à l'étuve jusqu'à obtention d'une masse constante. Après refroidissement dans un dessiccateur, les creusets contenant la prise d'essai sèche ont été pesés (P_2) et transportés jusqu'au four à moufle. Les échantillons étaient introduits dans le four, chauffés à 550 °C pendant 24 heures, retirés à l'aide des pinces puis refroidis dans un dessiccateur pendant 1 h environ avant d'être pesés (P_3). La teneur en cendres, pour 100 grammes de matière sèche (Tcs), a été calculée selon la formule ci-dessous.

$$\text{Tcs (\%)} = ((P_3 - P_1) \times 100) / (P_2 - P_1), \text{ avec :}$$

P_1 = masse du creuset vide ;

P_2 = masse de la poudre plus le creuset à la sortie de l'étuve et

P_3 = masse du creuset plus cendre.

Le résultat est la moyenne de deux essais.

II-2-1-c. Détermination de la teneur en cendres pour 100 g de matière fraîche.

La teneur en cendres pour 100 g de matière fraîche (Tcf) est obtenue selon la formule suivante :

$T_{cf} (\%) = ((P_3 - P_1) \times 100) / (P_2 - P_1)$ ou,

P₁ poids de la capsule vide ;

P₂ poids de la capsule plus l'échantillon frais ;

P₃ poids de la capsule plus cendre.

II-2-1-d. La solubilisation des cendres et extraction des minéraux.

Les métaux lourds ont été extraits des cendres obtenues ci-dessus.

-Principe

Il consiste à préparer des extraits à partir des cendres en les soumettant à une attaque acide pour libérer les éléments minéraux. En effet, les métaux contenus dans les cendres sous forme de sels de phosphates, sulfates et chlorures non volatilisés lors de la combustion sont solubles dans l'acide chlorhydrique et sont entraînés lors de la filtration pour constituer la solution de cendre ; tandis que les résidus minéraux incombustibles, issus de la combustion des composés organiques sont insolubles dans l'eau et constitueront le résidu de filtration (Maynard, 1970).

-Mode opératoire

0,10 g de cendre de chaque échantillon était pesé dans un bécher de 100 ml préalablement taré; 5ml d'acide chlorhydrique concentré et 20 ml d'eau distillée y étaient ajoutés. Le tout était chauffé à ébullition sur une plaque électrique jusqu'à obtention d'un tiers de solution. Après refroidissement la solution a été filtrée dans une fiole de 50 ml, sur du papier filtre Whatman ordinaire. Le volume était complété jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée et, enfin la solution de cendre obtenue était filtrée sous vide, sur une membrane de cellulose (à 0,45µm de diamètre des pores), par aspiration à la pompe (annexe 5), pour supprimer les fines particules en suspension. Les échantillons étaient gardés fermés dans des flacons, au frais à 4°C, jusqu'au dosage.

II-2-2. Préparation des sédiments.

Les sédiments secs étaient broyés dans un mortier, puis tamisés au travers d'un tamis de maille 250 µm. Dix (10) g de chaque sédiment étaient pesés dans un Erlen de 100 ml auxquels nous avons ajouté 50 ml d'acétate d'ammonium 1N. Le tout était homogénéisé sur un agitateur pendant 1heure, puis filtré à l'aide du papier filtre Whatman, dans une fiole de 100 ml. Le volume était ajusté à 100 ml avec de l'eau distillée et filtré enfin sur membrane de cellulose pour lecture au spectrophotomètre.

II-2-3. La préparation des échantillons d'eau.

Les bouteilles d'eau étaient décongelées à la température ambiante du laboratoire. Dans chaque fiole de 50 ml, on introduisait 0,5 ml d'acide chlorhydrique concentré. Chaque

bouteille était agitée et 50 ml de son contenu filtré dans la fiole de 50 ml contenant l'acide. Le volume final était filtré sur une membrane de cellulose.

II-3. Dosage au spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme (FAAS)

Les concentrations de ces différents métaux, dans les solutions obtenues, ont été déterminées par spectrométrie d'absorption atomique (AFNOR, 1992). L'appareil utilisé est un spectrophotomètre d'absorption atomique de flamme, marque VARIAN spectrAA 50B, alimenté par une flamme air-acétylène à la pression de l'air de 2,5-4 bars et celle de l'acétylène : 0,5-0,6 bar. Le courant d'alimentation était de 4 mA (Photo 4).



Source : Photographie KAYALTO B., 2008.

Photo 4 : Spectrophotomètre d'absorption atomique de flamme.

II-3-1. Principe de la spectrophotométrie d'absorption atomique (AAS)

Lorsque les atomes d'un élément sont excités par une flamme, ils émettent des radiations de longueur d'onde déterminée dont l'intensité peut être mesurée par spectrométrie. La concentration initiale du cation à doser est déduite de la valeur absolue de l'intensité de l'émission spectrale mesurée. Le principe de fonctionnement de l'appareil est schématisé ci-dessous :

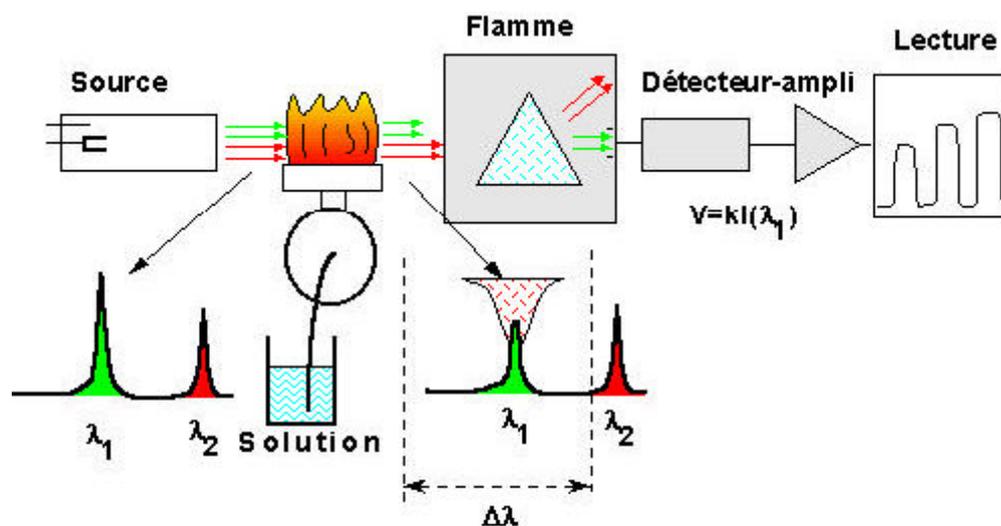


Figure 2 : Schéma de principe de la spectrophotométrie d'absorption atomique.

Source : Techniques spectrométriques, Ecole des Mines de Saint-Étienne.

II-3-2. Préparation des gammes étalons et dosage des échantillons

Les courbes d'étalonnage ont été établies à partir des solutions standard, de Arlington Texas, à 1000 ppm de métal dissous dans 3 % d'acide nitrique (HNO₃) et d'eau déminéralisée. Ces solutions étaient diluées.

II-3-2-a. Préparation de la solution étalon du cadmium et dosage.

La solution standard a été diluée quantitativement dans l'eau distillée pour obtenir les concentrations de 1, 2, 3, 4 et 5 µg/ml de cadmium. Les mesures des densités optiques (DO) ont été effectuées à la longueur d'onde de $\lambda = 228,8$ nm pour une fente (slit width) de 0,5 (Analytical methods, Varian 1989). La lampe utilisée est celle de Ag/Cd/Pb/Zn. Les concentrations (x), en µg/ml, sont calculées à partir des valeurs d'absorbances (DO) des équations linéaires de régression. L'équation de droite obtenue pour le cadmium était la suivante : $DO = 0,0358x$; $R^2 = 0,9951$.

II-3-2-b. Préparation de la solution étalon du plomb (Pb) et dosage.

La solution standard a été diluée quantitativement dans l'eau distillée pour obtenir les concentrations de 10, 20, 30, et 40 µg/ml de plomb. Les mesures des densités optiques (DO) ont été effectuées à la longueur d'onde de $\lambda = 217$ nm pour une fente de 1,0 (Analytical methods, Varian 1989). Les concentrations (x), en µg/ml, sont calculées à partir des valeurs d'absorbances de l'équation linéaire de régression obtenue : $DO = 0,0057x$. $R^2 = 0,9948$.

II-3-2-c. Préparation de la solution étalon du Chrome (Cr) et dosage.

La solution standard du chrome métallique à 1g/L a été diluée quantitativement dans l'eau distillée pour obtenir les concentrations de 5, 10, 15, et 20 µg/ml de chrome. Les mesures des densités optiques (DO) ont été effectuées à la longueur d'onde de $\lambda = 357,9$ nm pour une fente de 0,2 (Analytical methods, Varian 1989). Les concentrations (x), en µg/ml, ont été calculées à partir des valeurs d'absorbances de l'équation linéaire de régression obtenue : $DO = 0,0011x$; $R^2 = 0,9135$.

Nous avons prévu analyser aussi le mercure (Hg), mais pour des raisons techniques, cela n'a pu être réalisé. Il est très souhaitable que ce métal soit analysé dans les poissons, les sédiments et les eaux des mêmes sites dès que les conditions techniques le permettront.

-Expression des résultats

La teneur de chaque métal lourd en ppm de matière sèche (MS) a été calculée comme suit :

$$T = ((X \times V_T \times Tcs) / (m \times Vi)).$$

Avec :

X : concentration en $\mu\text{g/ml}$ de l'échantillon obtenue à partir des densités optiques lues ;

V_T : volume total de l'extrait ;

Tcs : teneurs en cendres totales pour 100 g de MS ;

m : masse de l'échantillon ;

V_i : prise d'essai (1mL).

Le résultat est la moyenne de trois essais par échantillon

II-3-3. Lecture au spectrophotomètre d'absorption atomique de flamme

II-3-3-a. Préparation de la machine

Après avoir allumé le spectrophotomètre, nous l'avons laissé chauffer pendant un certain temps. Sa mise en marche a été réalisée de la façon suivante :

Charger la méthode, aller dans cuisine, choisir l'élément à analyser ; exemple cadmium. Mode instrument : absorption ; lampe active : 1, valider (enter) ; courant 4 mA ; courant au repos : 0 ; correction : non ; type de gaz : air/acétylène ; λ : 228,8 nm ; fente : 0,5 (slit width) ; sauvegarder la méthode, en indiquant par exemple la position de l'élément. Dans notre cas, le Cd était en deuxième position après le Na. Calibrer, appuyer ; la lampe correspondante s'allume ; La machine est prête pour l'analyse. Optimiser enfin la lampe CC et le signal en mettant à zéro pour l'eau distillée en faisant Alt + lecture.

II-3-3-b. Lecture des résultats

Introduire sur la machine les valeurs des concentrations de chaque étalon, avec trois décimales, et faire enter ; la densité optique (DO) correspondante s'affiche. Passer au suivant, etc. Pour chaque série d'étalons, faire 3 répétitions et tracer la courbe d'étalonnage. On passe à la lecture des DO de nos échantillons en appuyant sur résultats. Afin d'éviter la contamination des échantillons, entre deux lectures, nous faisons passer 2 fois le tuyau d'absorption de la solution, dans l'eau distillée contenue dans deux béciers de 50 ml. Nous changeons l'eau de temps en temps. La sensibilité de l'appareil était vérifiée de temps en temps, en prenant un étalon au hasard, en lisant sa DO et, en comparant le résultat obtenu avec ceux obtenus lors de l'étalonnage.

La concentration en $\mu\text{g/ml}$, de la solution inconnue a été calculée à partir de l'équation de régression de chaque élément, obtenue de la droite d'étalonnage (annexe 4).

II-4. Analyses statistiques des résultats

L'analyse des résultats a été faite grâce au logiciel Statgraphics Plus version 5.0 à l'aide duquel nous avons effectué l'analyse des variances (ANOVA). Pour la construction des courbes et graphiques, nous avons utilisé les logiciels Sigma Plot 9.0 et Excel 2007.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'objectif du présent travail, était d'évaluer la teneur en métaux lourds tels que le plomb, le cadmium et le chrome dans les sédiments, et la contamination par ces métaux des poissons et des eaux du Lac Tchad.

III-1. Concentration des éléments traces métalliques dans les eaux et les sédiments du lac Tchad.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 8 pour les eaux et, dans le tableau 9 pour les sédiments.

Tableau 8 : Teneur en métaux lourds des eaux, en ppm, par site d'échantillonnage (Moyenne \pm écart type ; répétition n = 3).

Métaux Lourds	SITES D'ECHANTILLONNAGE DES EAUX				
		Logone	Chari	Mani	Lac Tchad
Cr	Moyenne \pm SD	2,02 \pm 0,13	2,02 \pm 0,13	2,32 \pm 0,34	2,32 \pm 0,27
Cd		nd	nd	nd	nd
Pb		nd	nd	nd	nd

SD : Ecart-type ;

nd : non détecté

La norme américaine pour l'eau potable est de 0,05 mg de Chrome (Cr) par litre d'eau (U.S. EPA, 1985). Nos populations pour la plupart, s'abreuvant directement dans les fleuves Chari et Logone, ainsi que des eaux du Lac Tchad, courent un risque réel pour leur santé ; car nos résultats moyens obtenus au niveau du logone et Chari, sont 40 fois supérieurs à cette norme ; tandis qu'au niveau du Lac Tchad nos résultats étaient 46 fois supérieurs.

Cette affirmation doit être cependant nuancée car d'après Davids *et al.* (1951), les effets toxiques connus du chrome chez l'homme sont attribuables surtout au chrome hexavalent (Cr VI); on considère le chrome trivalent (Cr III) comme un métal non toxique. Notre analyse concerne le chrome total.

La moyenne de concentration des trois échantillons par site pour l'eau, montre une augmentation de l'amont (Logone et Chari) vers l'aval (Lac Tchad). Nos résultats vont de 2,02 mg/L, au niveau du Logone et Chari ; à 2,32 à Mani et au Lac Tchad. Ceci démontre donc un processus normal d'accumulation vers le Lac Tchad. Si nous considérons les plages (minimum-maximum), les résultats sont les mêmes au niveau des deux fleuves Chari et Logone (1,82-2,12) et ; au niveau de Mani et du Lac Tchad (2,12-2,73 mg/L).

Tableau 9: Teneur en métaux lourds des sédiments, en ppm, par site d'échantillonnage (Moyenne \pm écart moyen).

Métaux Lourds		SITES D'ECHANTILLONNAGE DES SEDIMENTS			
		N'Djaména	Mani	Hadidé	Lac Tchad
Cr	Moyenne \pm SD	15,15 \pm 4,04	14,14 \pm 6,74	9,09 \pm 0,00	9,09 \pm 0,00
Cd		nd	nd	nd	nd
Pb		nd	nd	nd	nd

Les métaux lourds : le cadmium et le plomb étaient en dessous de la limite de détection de notre technique instrumentale employée, dans les deux compartiments (eaux et sédiments) et ceci dans tous les échantillons. Quant au chrome, il a été détecté dans tous les échantillons des eaux et des sédiments.

En ce qui concerne les sédiments, les moyennes de concentrations vont de 9,09 $\mu\text{g/g}$ au Lac Tchad à 15,15 au niveau du site de N'Djaména. Les plages sont de 9,09-18,18 et 9,09-24,24 $\mu\text{g/g}$, respectivement, pour N'Djaména et Mani. Au Lac Tchad la moyenne de 9,09 est la même teneur dans tous les échantillons.

La constitution de la République du Tchad adoptée par référendum du 31 mars 1996 intègre l'aspect environnemental comme priorité de l'Etat. L'article 48, al.2 stipule clairement que « sont interdits le transit, l'importation, le stockage, l'enfouissement, le déversement sur le territoire national des déchets toxiques ou polluants étrangers ».

L'article 346 du code pénal tchadien (Titre 9) stipule que : est punissable « quiconque aura intentionnellement pollué des cours d'eau, en y déversant des produits toxiques susceptibles de détruire les poissons ou autres animaux, ou d'en faciliter la capture ».

La Loi n° 14/PR/98 du 18 juillet 1998 du Ministère de l'Environnement et de l'Eau définit les principes généraux de la protection de l'environnement et a pour objet « d'établir les principes pour la gestion durable de l'environnement et sa protection contre toutes les formes de dégradation, afin de sauvegarder et valoriser les ressources naturelles et d'améliorer les conditions de vie de la population ».

Nos résultats sont supérieurs à ceux de Rashed, Altindag, Durum et Weiler ; que nous avons consulté :

Rashed (2001), en Egypte, dans le Lac Nasser, relève une moyenne de 0,24 mg/L. Altindag et Sibel (2005), dans le Lac Beysehir en Turquie, ont eu des valeurs allant de 0,027 à 0,028 mg/L. Durum et Haffty (1961), Weiler et Chawla (1969) ; dans leurs travaux, ont

retrouvé, dans les Grands Lacs du Canada, des teneurs moyennes d'environ 0,001 mg/L, dans une plage allant de 0,0002 à 0,019 mg/L ; et dans les rivières canadiennes des teneurs allant de 0,002 à 0,023 mg/L. Le Conseil national de recherche du Canada (NRCC n° 15017, 1976) a trouvé que les concentrations de chrome dans les eaux canadiennes étaient en général inférieures à 0,025 mg/L. Les données obtenues par les stations NAQUADAT de 1980 à 1985 montrent que les concentrations de chrome total dans les eaux brutes du Canada Central vont du seuil de détection de 0,002 mg/L jusqu'à 0,044 mg/L ; dans la région de l'Atlantique elles sont comprises entre ce même seuil de détection et 0,024 mg/L (NAQUADAT, 1985).

Toutes ces données, montrent une augmentation, dans le temps, de la teneur en chrome dans les eaux canadiennes. Cependant, les eaux intérieures en contiennent plus que celles de l'Atlantique.

La commissaire à l'environnement et au développement durable du Canada (CEDDC), dans son rapport d'Octobre (2001), souligne ceci : La croissance industrielle et démographique et ses effets se sont surtout manifestés dans les lacs Ontario et Érié. Au début des années 1900, les effluents provenant de l'industrie minière et des usines de pâtes et papiers contenaient d'importantes quantités de mercure et de plomb. La contamination au plomb du lac Ontario tripla pratiquement de 1880 à 1920. L'essor économique des 20 dernières années s'accompagne d'améliorations au chapitre de la santé environnementale du bassin. La totalité des émissions de substances volontairement ciblées par l'industrie des produits chimiques est passée de 1 092 tonnes en 1988 à 324 tonnes en 2000. Ceci montre que pour le Tchad, en adoptant des technologies de réduction des émissions des effluents (stations d'épuration) et en appliquant la réglementation la situation pourrait s'améliorer.

Au Canada, la contribution des aliments à l'apport quotidien de chrome est beaucoup plus forte que celle de l'eau potable. Celle-ci ne contribue que pour 10 % à l'apport alimentaire de chrome (NAQUADAT, 1985).

Nos résultats qui vont de 9,09 à 24,24 µg de chrome par g de sédiment, montrent une pollution plus avancée que dans les six lacs de la Turquie, dans le Tokat, ou Durali *et al.* (2007), ont trouvé des concentrations allant de 0,08 à 7,41 µg de chrome par g de sédiment. Il en est de même, pour les sédiments du Lac Beysehir en Turquie, ou Altindag *et al.* (2005), ont trouvé des concentrations allant de 9,93 à 11,12 µg/g.

Cependant, la pollution des deux fleuves tchadiens, et du Lac Tchad, est inférieure à celle du Lac Nasser en Egypte, ou Rashed (2001), a révélé, une concentration moyenne de 79 µg/g de sédiment. Rashed, en comparant les concentrations dans l'eau et les sédiments, qui étaient respectivement de 240 µg/L et 79 µg/g ; expliquait ses résultats en disant qu'il

s'agissait d'une pollution récente, parce que la concentration dans les sédiments était inférieure à celle des eaux. Dans notre cas, la situation inverse, sédiments plus contaminés que les eaux, montrerait une pollution ancienne, donc des mesures urgentes doivent être envisagées.

L'analyse des variances entre les sites de prélèvement (annexe 6), montre qu'il y a homogénéité entre les sites de prélèvement d'eaux et des sédiments ; cependant, elle montre une différence significative ($p = 0,0038$) à 95% entre la contamination des sites d'eaux et des sites des sédiments. Cela veut dire que la contamination des eaux et des sédiments, n'est pas la même. Cette différence concerne particulièrement les sites de N'Djaména (eau)-N'Djaména (sédiments) ; N'Djaména (eau)-Mani (sédiments) ; Mani (eau)- N'Djaména (sédiments) ; Mani (eau)-Mani-(sédiments) ; Lac Tchad (eau)- N'Djaména (sédiments) et Lac Tchad (eau)- Mani-(sédiments).

La moyenne très élevée de N'Djaména, s'expliquerait par le fait que ce site choisi, se trouve en aval du grand canal du Rond point de la fontaine, qui draine une bonne partie des eaux usées de N'Djaména. Ceci dénoterait un apport non négligeable du chrome, par les effluents de N'Djaména.

La valeur maximale de 24,24 $\mu\text{g/g}$, au site de Mani reflète la réalité du site. En effet, il s'agit d'un bras du chari qui forme un petit lac permanent, utilisé pour l'irrigation des cannes à sucre. Pour ce qui est de la tendance à la baisse vers le lac, celle-là serait-elle due à une absorption du chrome par les argiles ou le recouvrement des couches successives lors du transport des sédiments par l'eau ? En effet, chaque année, particulièrement, le fleuve Logone transporte des quantités importantes d'argile et de limon vers le Lac Tchad. C'est la raison pour laquelle, lorsqu'à notre arrivée, en Novembre 2008, à la Direction de la Société de Développement du Lac Tchad (SODELAC), société qui pratique la culture du maïs, du blé et des pommes de terre ; pour avoir les données sur l'utilisation des engrais et des produits phytosanitaires par ladite société, comme source probable de pollution du Lac Tchad; le responsable des intrants, nous a fait savoir qu'ils n'utilisaient pas d'engrais, à cause de la richesse de ces apports alluvionnaires lors des crues. La SODELAC n'utilise que les produits phytosanitaires, de temps à autre, pour lutter contre les maladies et les ravageurs de ces plantes quand cela s'avérait nécessaire.

Nos résultats dans les sédiments, allaient de 9,09 à 24,24 $\mu\text{g/g}$. Ces valeurs sont supérieures à toutes celles que nous avons pu prendre connaissance dans la littérature scientifique. Tariq *et al.* (1991), dans le fleuve Ravi du Pakistan, ont trouvé des concentrations allant de 0,08 à 7,41 $\mu\text{g/g}$. Altindag *et al.*, (2005), ont obtenu les valeurs allant

de 9,93 à 11,12 $\mu\text{g/g}$, dans le Lac Beysehir, tandis que Durali *et al.*, (2006), ont eu des résultats allant de 4,4 à 10,7 $\mu\text{g/g}$, dans les six lacs du Tokat, tous en Turquie.

Les résultats dans l'eau et les sédiments nous suggèrent qu'il y aurait pollution par le chrome. Comme explication à cette teneur élevée en Chrome dans les eaux et sédiments du Tchad, en considérant l'annexe 3 (Quantité de produits chimiques utilisés au Tchad par secteur d'activité, MEE, 2004) et le tableau IV (Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement, Biney et al. 1995), nous disons que cela serait dû aux engrais, pigments et peintures importés ; à la STT (utilisation du chrome comme fixateur des teintures), au refroidissement des moteurs de la STEE et de la SONASUT (Chrome, élément anti corrosion des moteurs).

Quelle serait alors la situation dans les poissons qui vivent dans ces milieux ?

III-2. Bioaccumulation des métaux lourds dans les différentes parties des poissons du Lac Tchad.

Le tableau 10, nous montre la taille et le poids des différents poissons étudiés.

Tableau 10 : Taille et poids des poissons de l'étude

ESPECES	Longueur (cm)	POIDS (g)
Carpe pt	25	378
Carpe moy.	31	682
Carpe grde	35	1154
Capitaine pt	34	510
Capitaine moy	40	1014
Capitaine grd	62	1714
Machoir pt	39	162
Machoir moy.	69,5	1496
Machoir grd	56	2464

où pt, moy. et grd ; indiquent respectivement petit, moyen et grand, en ce qui concerne les poids des poissons. Nous avons choisi des poissons de poids différents, critère d'âge, afin d'évaluer la bioaccumulation.

Nos résultats moyens, exprimés en %, en ce qui concerne la matière sèche (MS) des différents organes de nos poissons se trouvent dans le tableau 11.

Tableau 11: La teneur en eau et en matière sèche (MS) des poissons du Lac Tchad.

ESPECE	POIDS (Kg)	PARTIES	CODE	Prise d'essai fraiche	% H2O	% MS	% moyen MS/organe
CARPE pt	0,378	TETE	CpT	83,308	64,03	35,97	CT : 32,80
		FOIE	CpF	3,88	76,88	23,12	CF : 23,02
		CHAIR	CpC	96,413	79,37	20,63	CC : 20,77
		OS	CpO	19,644	60,56	39,44	CO : 37,72
CARPE moy.	0,682	TETE	CmT	130,562	75,01	24,99	
		FOIE	CmF	7,177	75,09	24,91	
		CHAIR	CmC	115,43	80,02	19,98	
		OS	CmO	41,515	68,12	31,88	
CARPE grde	1,154	TETE	CgT	205,818	62,56	37,44	
		FOIE	CgF	10,681	78,96	21,04	
		CHAIR	CgC	182,708	78,32	21,68	
		OS	CgO	72,03	58,16	41,84	
CAPITAINE pt	0,510	TETE	KpT	89,288	66,45	33,55	KT : 35,97
		FOIE	KpF	5,217	75,77	24,23	KF : 23,70
		CHAIR	KpC	114,852	77,99	22,01	KC : 22,00
		OS	KpO	26,757	59,20	40,80	KO : 42,40
CAPITAINE moy.	1,014	TETE	KmT	154,163	65,24	34,76	
		FOIE	KmF	8,321	75,89	24,11	
		CHAIR	KmC	186,57	79,63	20,37	
		OS	KmO	52,378	58,70	41,30	
CAPITAINE grd	1,714	TETE	KgT	256,645	60,40	39,60	
		FOIE	KgF	1,916	77,24	22,76	
		CHAIR	KgC	238,317	76,37	23,63	
		OS	KgO	87,44	54,89	45,11	
MACHOIRON pt	0,162	TETE	MpT	30,903	75,59	24,41	MT : 31,04
		FOIE	MpF	1,195	81,34	18,66	MF : 20,37
		CHAIR	MpC	68,353	81,58	18,42	MC : 20,43
		OS	MpO	9,928	69,39	30,61	MO : 36,18
MACHOIRON moy	1,496	TETE	MmT	252,713	64,97	35,03	
		FOIE	MmF	10,891	80,17	19,83	
		CHAIR	MmC	214,224	79,36	20,64	
		OS	MmO	97,657	61,44	38,56	
MACHOIRON grd	2,464	TETE	MgT	564,641	66,31	33,69	
		FOIE	MgF	20,81	77,37	22,63	
		CHAIR	MgC	294,082	77,79	22,21	
		OS	MgO	199,117	60,62	39,38	

De ce tableau, il ressort que les concentrations moyennes en MS étaient les suivantes (moyenne \pm écart-type), par organe de chaque espèce, en % :

-Carpes : têtes et branchies ($32,80 \pm 5,20$), foies ($23,02 \pm 1,32$), chairs ($20,77 \pm 0,61$) et os ($37,72 \pm 3,89$). La plus faible teneur en matière sèche se trouvait dans la chair (20,77%) et la plus forte dans les os (37,72%).

-Capitaines: têtes ($35,97 \pm 2,42$), foies ($23,70 \pm 0,63$), chairs ($22,00 \pm 1,09$) et os ($42,40 \pm 1,80$). La plus faible teneur, était toujours dans la chair (22,00) et la plus forte dans les os (42,40 %).

-Machoirons : têtes ($31,04 \pm 4,43$), foies ($20,37 \pm 1,50$), chair ($20,43 \pm 1,34$) et os ($36,18 \pm 3,72$). Cette fois-ci, c'était dans les foies que nous avons la plus faible teneur en MS (20,37%), et toujours dans les os que nous avons la plus forte (36,18 %).

En ce qui concerne la teneur en cendres totales (en % de la MS) de chaque organe prélevé, nos résultats sont consignés dans le tableau 12.

Le pourcentage en cendres totales de chaque organe est la moyenne de deux répétitions.

Tableau 12 : Teneur en cendres totales des organes des poissons du Lac Tchad.

ESPECE	POIDS (kg)	PARTIES	CODE	%MS	Prise d'essai, g	%CENDRES TOTALES	ECART- TYPE CENDRES	% moyen cendres/org
CARPE pt	0,378	TETE	CpT	35,97	7,37	27,11	0,97	CT:31,03
		FOIE	CpF	23,12	0,78	4,85	0,63	CF:5,11
		CHAIR	CpC	20,63	7,34	5,90	0,25	CC:5,93
		OS	CpO	39,44	7,34	33,79	0,68	CO:34,49
CARPE moy.	0,682	TETE	CmT	24,99	7,04	34,23	1,34	
		FOIE	CmF	24,91	1,51	1,22	0,17	
		CHAIR	CmC	19,98	5,14	6,18	0,01	
		OS	CmO	31,88	6,26	35,60	0,29	
CARPE grd	1,154	TETE	CgT	37,44	7,11	31,76	1,19	
		FOIE	CgF	21,04	1,86	9,24	0,35	
		CHAIR	CgC	21,68	4,97	5,71	1,02	
		OS	CgO	41,84	6,86	34,10	0,57	
CAPITAINE pt	0,510	TETE	KpT	33,55	7,23	32,78	1,37	KT:35,19
		FOIE	KpF	24,23	1,21	4,68	0,37	KF:3,84
		CHAIR	KpC	22,01	6,97	5,04	0,31	KC:4,81
		OS	KpO	40,80	9,67	36,84	0,11	KO:37,69
CAPITAINE moy.	1,014	TETE	KmT	34,76	7,16	35,43	0,41	

		FOIE	KmF	24,11	1,86	0,67	0,08	
		CHAIR	KmC	20,37	7,00	4,56	0,23	
		OS	KmO	41,30	7,05	37,39	0,28	
CAPITAINE	1,714	TETE	KgT	39,60	10,15	37,36	0,06	
grd								
		FOIE	KgF	22,76	0,32	6,17	0,62	
		CHAIR	KgC	23,63	10,22	4,83	0,10	
		OS	KgO	45,11	9,80	38,83	0,32	
MACHOIRON	0,162	TETE	MpT	24,41	5,03	37,55	0,12	MT:30,95
pt								
		FOIE	MpF	18,66	0,16	11,59	1,22	MF:7,25
		CHAIR	MpC	18,42	5,57	4,99	0,86	MC:5,05
		OS	MpO	30,61	2,93	38,71	0,15	MO:35,20
MACHOIRON	1,496	TETE	MmT	35,03	9,75	31,67	0,06	
moy.								
		FOIE	MmF	19,83	1,94	7,11	0,15	
		CHAIR	MmC	20,64	9,69	4,92	0,10	
		OS	MmO	38,56	8,27	34,95	0,00	
MACHOIRON	2,464	TETE	MgT	33,69	9,76	23,64	0,18	
grd								
		FOIE	MgF	22,63	4,52	3,04	0,08	
		CHAIR	MgC	22,21	9,93	5,25	0,12	
		OS	MgO	39,38	7,77	31,93	1,05	

De ce tableau, il ressort que les concentrations moyennes en cendres étaient les suivantes (moyenne \pm écart-type), par organe de chaque espèce, en % :

-Carpes : têtes ($31,03 \pm 2,62$), foies ($5,11 \pm 2,76$), chair ($5,93 \pm 0,17$) et os ($34,49 \pm 0,74$). La plus faible teneur a été relevée dans les foies (5,11%) et la plus forte, dans les os (34,49 %). Ceci s'explique par le fait que, les os sont constitués des phosphates de calcium ou apatite, $Ca_3(PO_4)_2$; le calcium reste après incinération.

-Capitaines: têtes ($35,19 \pm 1,61$), foie ($3,84 \pm 2,11$), chair ($4,81 \pm 0,17$) et os ($37,69 \pm 0,78$). La plus faible teneur était toujours dans le foie (3,84 %) et la plus forte, dans les os (37,69 %).

-Machoirons: têtes ($30,95 \pm 4,88$), foie ($7,25 \pm 2,89$), chair ($5,05 \pm 0,13$) et os ($35,20 \pm 2,34$). La plus faible teneur en cendres des machoirons, s'est retrouvée plutôt dans la chair (5,05 %) tandis que la plus élevée était toujours dans les os (35,20 %).

Dans les tableaux 13, 14 et 15, sont présentés nos résultats en ce qui concerne les concentrations des métaux, respectivement dans les organes des carpes, des capitaines et des machoirons.

Tableau 13. Moyenne \pm écart-type (SD) de la concentration ($\mu\text{g/g}$ de MS) des métaux lourds dans les organes des carpes du Lac Tchad.

Métaux lourds				
	Organes	Carpe pt	Carpe moy,	Carpe grde
Cd	Tête			nd
	Foie			0,45 \pm 0,57
	Chair			nd
	Os	nd	nd	nd
Cr	Tête	123,22 \pm 0,00	152,54 \pm 0,00	192,5 \pm 64,17
	Foie	157,61 \pm 0,00	5,57 \pm 0,00	56 \pm 18,67
	Chair	26,55 \pm 0,00	28,11 \pm 0,00	51,93 \pm 0,00
	Os	153,58 \pm 0,00	215,74 \pm 71,91	258,3 \pm 68,88
Pb	Tête	5,15 \pm 0,53	nd	nd
	Foie	nd	nd	nd
	Chair	nd	15,14 \pm 7,57	10,94 \pm 4,17
	Os	nd	16,14 \pm 7,53	nd
			2,18 \pm 0,36	nd

nd : non détecté

Conformément au tableau 13, la plus grande concentration du cadmium se trouvait dans le foie de la petite carpe (16,14 $\mu\text{g/g}$ de MS ou 4,03 $\mu\text{g/g}$ de MF) suivie des concentrations des têtes (et branchies) de la petite (15,14 $\mu\text{g/g}$ de MS) et moyenne (10,94 $\mu\text{g/g}$ de MS) carpes. Le plomb a été retrouvé dans un seul échantillon : dans la tête de la petite carpe, à la concentration moyenne de 5,15 \pm 0,53 $\mu\text{g/g}$ de MS. Le cadmium était détecté uniquement dans les carpes.

Tableau 14. Moyenne \pm écart-type (SD) de la concentration ($\mu\text{g/g}$ de MS) des métaux lourds dans les capitaines du Lac Tchad.

Métaux lourds				
	Organes	Capitaine pt	Capitaine moy,	Capitaine grd
Cr	Tête	298,03 \pm 0,00	214,74 \pm 71,58	339,65 \pm 0,00
	Foie	28,37 \pm 9,46	6,1 \pm 0,00	28,06 \pm 0,00
	Chair	30,57 \pm 10,19	34,54 \pm 9,21	43,92 \pm 0,00
	Os	167,46 \pm 0,00	283,27 \pm 75,57	353,02 \pm 0,00

Cd	Dans tous	nd	nd	nd
Pb	les	nd	nd	nd
	organes			

Tableau 15. Moyenne \pm écart-type (SD) de la concentration ($\mu\text{g/g}$ de MS) des métaux lourds dans les organes des machoiron du Lac Tchad.

Métaux lourds				
	Organes	Machoirion pt	Machoirion moy.	Machoirion grd
Cr	Tête	284,47 \pm 75,86	287,88 \pm 0,00	179,08 \pm 47,76
	Foie	105,32 \pm 0,00	53,89 \pm 14,37	27,68 \pm 0,00
	Chair	45,33 \pm 0,00	44,75 \pm 0,00	39,76 \pm 10,60
	Os	351,93 \pm 0,00	317,69 \pm 0,00	290,25 \pm 0,00
Cd	Dans tous	nd	nd	nd
Pb	les	nd	nd	nd
	organes			

nd : non détecté

Des tableaux 14 et 15, il ressort que le plomb et le cadmium étaient en dessous du seuil de détection du spectrophotomètre utilisé (Pb : 0,7 $\mu\text{g/ml}$; Cd : 0,03 $\mu\text{g/ml}$) et ceci, dans tous les organes des capitaines et des machoiron.

Dans le tableau 16, nous avons la quantité de métal lourd, en mg, par poisson. Cette quantité a été obtenue selon la formule suivante : $Q = \Sigma (MS \cdot T)$ ou MS est la matière sèche d'un organe, en grammes, obtenue à partir de la prise d'essai fraîche et T, la teneur en métal lourd, par organe, en $\mu\text{g/g}$. Il est à noter que, les organes tels que la tête et les branchies et le foie ont été prélevés entiers. La quantité totale fraîche de la chair, a été obtenue par différence du poids entier de poisson d'avec les organes précités plus les os et les viscères.

En considérant les normes de l'U.E. (régulation 1881/2006), les doses hebdomadaires tolérables, en mg/kg de poisson frais, sont respectivement : pour le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) de : 0,050-0,3 ; 0,3. Quant au Chrome, le U.S. Food and Nutrition Board de 1980, autorise 0,05 à 0,2 mg/j pour l'homme.

Tableau 16 : Quantité, en mg, de métal lourd par poisson.

Espèce	poids en gr	parties	Teneur par organe, $\mu\text{g/g}$			Quantité par organe, mg.			Quantité métal par poisson, mg		
			Pb	Cd	Cr	Pb	Cd	Cr	Pb	Cd	Cr
carpe pt	378	tête	5,15	15,14	123,22	0,15	0,45	3,69	0,15	0,57	6,32
		foie		16,14	157,61		0,01	0,14			
		chair		2,18	26,55		0,11	1,29			
		os			153,58			1,19			
carpe moy.	682	tête		10,94	152,54		0,36	4,98			

carpe grde	1154	foie	5,57	0,01	0,36	10,30
		chair	28,11	2,46		
		os	215,74	2,86		
capitaine pt	510	tête	192,50	14,83	0,0048	31,40
		foie	2,15 56,00	0,13		
		chair	51,93	8,66		
capitaine moy	1014	os	258,30	7,78	13,09	22,74
		tête	298,03	8,93		
		foie	28,37	0,04		
capitaine grd	1714	chair	30,57	2,30	62,48	4,15
		os	167,46	1,83		
		tête	214,74	11,51		
machoirion pt	162	foie	6,10	0,01	47,14	70,14
		chair	34,54	5,09		
		os	283,27	6,13		
machoirion moy	1496	tête	339,65	34,52	70,14	70,14
		foie	28,06	0,01		
		chair	43,92	14,02		
machoirion grd	2464	os	353,02	13,92	70,14	70,14
		tête	284,47	2,15		
		foie	105,32	0,02		
machoirion moy	1496	chair	45,33	0,91	70,14	70,14
		os	351,93	1,07		
		tête	287,88	25,49		
machoirion grd	2464	foie	53,89	0,12	70,14	70,14
		chair	44,75	9,58		
		os	317,69	11,96		
machoirion moy	1496	tête	179,08	34,07	70,14	70,14
		foie	27,68	0,13		
		chair	39,76	13,18		
machoirion grd	2464	os	290,25	22,76	70,14	70,14

Ce tableau nous montre clairement que la consommation quotidienne des poissons du Lac Tchad, exposerait les consommateurs à des risques élevés pour leur santé car les teneurs en ces métaux sont supérieures aux normes précitées. Le risque d'accumulation de ces métaux dans l'organisme est réel et les effets néfastes à craindre.

A titre de comparaison, nous donnons dans le tableau XVII ci-dessous, les normes existantes, européennes (^aU.E., régulation 1881/2006), américaines (^eU.S. EPA, 1985 : eau potable et ^f U.S. Food and Nutrition Board, 1980) et de la JECFA OMS/FAO, 2004) des métaux lourds ; dans l'eau, dans les poissons et chez l'Homme.

Tableau 17 : Norme des micropolluants (UE, USA, JECFA FAO/OMS).

Micropolluants	EAU	POISSONS ^a	HOMME	Rejets
	POTABLE	(DHPT) mg/kg,	(µg/kg)	industriels ^g
		MF		
		Min-max		

Mercure	1 µg/L ^g	0,5-1,0	1,6 ^b (CH ₃ -Hg)	-
Cadmium		0,050-0,3	7 ^c	
Plomb	50 µg/L ^g	0,3	25 ^d	0,5 mg/L si rejet > 5g/j
Chrome	0,05 mg/L ^e		0,05-0,2 mg/j ^f	0,5 mg/L si rejet
Total				> 5g/j 0,1 mg/j si rejet > 1g/j (Cr VI)

N.B : Les valeurs minimales pour les poissons, correspondent aux normes de la chair, pour les espèces non prédatrices, et celles maximales, pour les espèces prédatrices ; exemple : Cd 0,050-0,3

Sources :

DHPT : Dose Hebdomadaire Provisoirement Tolérable

^aU.E., réglementation 1881/2006 (MF), applicable à partir du 1^{er} Mars 2007.

^b(CH₃-Hg), JECFA, FAO/OMS, 20004b.

Selon la commission de régulation de l'Union Européenne, du 19 Décembre 2006, le méthylmercure est la forme chimique du mercure la plus soupçonnée, car il constitue 90 % du mercure total du poisson et des produits marins.

^cJECFA, FAO/OMS, 2004a

^dJECFA, FAO/OMS, 2000

^eU.S. EPA, 1985 (eau potable).

^fU.S. Food and Nutrition Board, 1980.

^gNormes françaises pour la qualité de l'eau potable – Décret n° 89-3 du 3 janvier 1989 modifié.

D'après Farkas *et al.* (2003), la concentration des métaux dans les branchies, reflète la concentration de ces métaux dans l'eau, tandis que la concentration dans le foie, indique le stockage de ces métaux. La chair de la petite carpe avait une concentration de 2,18 µg/g de MS (0,54 µg/g de MF) concentration presque similaire à celle du foie de la grande carpe. La concentration dans la chair de la carpe est dix (10) fois supérieure à la norme Européenne de 2006. Cette situation où le cadmium était détecté dans les poissons mais non dans l'eau, a été rapportée dans les travaux de King Ming Chan (1995), dans les eaux autour du Port Victoria, de Hong Kong en Chine et ceux de Chale (2002), dans le Lac Tanganyika en Tanzanie. King Ming Chan, avait trouvé dans les branchies des poissons, des valeurs 112 fois supérieures à la

norme (0,3 µg/kg), de l'Union Européenne dans les poissons prédateurs, alors que dans l'eau, la concentration était très faible : 0,008 à 0,11 µg.

Chale 2002) dans ses travaux, avait relevé que le cadmium dans l'eau était en dessous du seuil de détection de ce métal : 0,01µg alors que dans les poissons, il avait trouvé des valeurs deux fois supérieures aux mêmes normes Européennes.

Dans la littérature scientifique, on trouve beaucoup des travaux concernant le cadmium dans les poissons. Nos résultats (0,54 µg/g de MF), pour le cadmium dans la chair, sont similaires à ceux de Allinson *et al.* (2002), dans les eaux Sri Lankaises où ils ont trouvé 0,01 à 0,5 µg/g de matière fraîche (MF). Les résultats de Allinson *et al.*, dans le foie variaient de 0,00 à 2,00 µg/g de MF. Par rapport aux auteurs qui expriment leurs résultats en fonction de la matière fraîche (MF), nous trouvons que le niveau de contamination de la chair de nos carpes, était inférieur à celui de trois espèces de poissons, dont le *Lates* de notre étude, étudiées dans le Lac Tanganyika, en Tanzanie, par Chale (2002). Ses résultats, allaient de 0,25 à 0,65 µg/g de MF. Cependant, la chair de nos carpes, s'est révélée, plus contaminé que celle des poissons étudiés par : Iman *et al.* (2002) en Arabie Saoudite, Patrizia *et al.* (2003) en Espagne, Herreros *et al.* (2008) en Espagne. Iman *et al.*, dans quatre espèces de poisson, du golfe Arabique, ont eu des concentrations allant de 0,0012 à 0,04 µg/g de MF. Patrizia *et al.*, dans le *Liza aurata* du Lac Ganzirri, ont obtenues les valeurs suivantes de concentration : filet (0,03-0,09 µg/g de MF), branchies (0,02-0,04 µg/g) et os (0,06-0,07 µg/g de MF). Herreros *et al.*, dans les chairs de deux espèces de poisson, achetées sur les marchés de Madrid, ont trouvé des concentrations allant de 0,02 à 0,25 µg/g de MF.

Le positionnement de nos résultats par rapport à ceux des auteurs qui ont exprimé leurs concentrations en fonction de la matière sèche (MS), est le suivant : La concentration en cadmium, retrouvée dans la chair de nos carpes (2,18 µg/g de MS), était inférieure à celle des travaux de King Ming Chan (1995), et Aysun *et al.*, (2005). King Ming Chan, autour du Port Victoria, de Hong Kong en Chine, a eu les résultats suivants : chair (0,6-7,1 µg/g de MS), branchies (6,0-33,6 µg/g) et os (1,7-25,4 µg/g de MS). Quant à Aysun *et al.*, dans la baie Iskenderun, au Nord-est de la mer Méditerranée, en Turquie ; sur trois espèces de poisson, la moyenne dans les chairs, variait de 0,02 à 4,16 µg/g de MS.

Cependant, nos concentrations en cadmium, trouvées dans la chair des carpes, se sont révélées supérieures à celles des six travaux que nous avons consultés. Il s'agit des travaux de Alam *et al.* (2002), Farkas *et al.* (2003), Durali *et al.* (2005), Gabriella *et al.* (2005), Alexandra *et al.* (2005) et Altindag *et al.* (2005). Alam *et al.*, dans les carpes du Lac Kasumigaura, au Japon, ont obtenu les résultats suivants : chair (0,009 µg/g), foie (0,010

$\mu\text{g/g}$) et reins (0,273 $\mu\text{g/g}$). Quant à Farkas *et al.*, sur l'espèce *Abramis brama* L., dans le Lac Balaton en Hongrie, leurs résultats étaient les suivants : filet (0,42-0,61 $\mu\text{g/g}$), branchies (1,10-1,25 $\mu\text{g/g}$) et foie (1,61-2,10 $\mu\text{g/g}$). Durali *et al.*, sur sept espèces de poisson, de sept (7) lacs de la Turquie, ont obtenu des concentrations moyennes allant de 0,1 à 1,2 $\mu\text{g/g}$, tandis que Gabriela *et al.*, autour du Port Tomis, dans la mer Noire, ont obtenu des valeurs allant de 0,02 à 1,71 $\mu\text{g/g}$. Alexandra *et al.*, dans leurs travaux, sur dix (10) espèces de poissons, dans le fleuve Drome, région Rhône-Alpes, en Espagne, ont obtenu des résultats compris dans la plage de 0,0025-0,12 μg de cadmium par gramme de MS. Enfin, Altindag *et al.*, dans la chair et les branchies, de quatre espèces étudiées, du Lac Beysehir en Turquie, ont trouvé les concentrations suivantes : chair (0,50-0,66 $\mu\text{g/g}$) et branchies (0,53-0,74 $\mu\text{g/g}$).

Beaucoup d'auteurs affirment que : la chair de poisson, présente habituellement, le plus faible potentiel d'accumulation des métaux lourds, tandis que le foie et les reins présentent celui le plus élevé (Lafaurie *et al.*, 1981 ; Lafaurie, 1982 ; Hilmy *et al.*, 1983 ; Dallinger *et al.*, 1987 ; Chen et Chen, 1999). Nos résultats obtenus dans les carpes suivent cette évolution : chair (2,18 $\mu\text{g/g}$ de MS), foie (16,14 $\mu\text{g/g}$ de MS).

Le chrome a été retrouvé dans tous les poissons, à des concentrations très élevées. Dans les carpes, la plus petite concentration (5,57 $\mu\text{g/g}$) a été détectée dans le foie de la carpe moyenne et c'était dans les os de la colonne vertébrale de la grande carpe, que la concentration était la plus élevée (258,30 $\mu\text{g/g}$).

La tendance, avec l'âge, est la même, dans toutes les carpes, quand nous voyons, les concentrations dans les têtes et les os. Avec l'augmentation du poids (l'âge donc), de la petite carpe à la grande, la concentration du chrome, augmentait dans les têtes et les os, respectivement, de 123,22 à 192,50 et de 153,58 à 258,30. Dans la chair, elle augmentait également, de la petite carpe à la grande, de 26,55 à 51,93 $\mu\text{g/g}$.

Ces tendances ont été confirmées par l'analyse des variances (annexe 7), en ce qui concerne le poids et la tête. Il y avait une corrélation positive et significative ($r = 0,99$; $p = 0,02$) entre le poids et la concentration du chrome dans les têtes des carpes. Cela signifie que, lorsque le poids des carpes augmente, il y a bioaccumulation du chrome dans les têtes. Par contre, cette corrélation était positive mais non significative, entre le poids et les os ($r = 0,97$; $p = 0,14$) et entre le poids et la chair ($r = 0,94$; $p = 0,21$). L'explication ici est que, le poids et la concentration du chrome dans les os et la chair ; croissent dans le même sens, mais cette augmentation n'est pas significative. Quant aux foies, c'est dans la plus petite carpe que la concentration était la plus élevée (157,61 $\mu\text{g/g}$), suivie de celle de la grande carpe (56,00 $\mu\text{g/g}$). Entre les organes, il y avait une forte corrélation positive entre la tête et les os ; mais

elle n'était pas significative ($r = 0,98$; $p = 0,12$). La concentration du chrome dans ces deux organes croit dans le même sens.

En ce qui concerne les capitaines, on note la même évolution, dans la chair et les os. La concentration du chrome dans les deux organes croit avec le poids. Les résultats sont compris dans les plages de (30,57-43,92 $\mu\text{g/g}$) et de (167,46-353,02 $\mu\text{g/g}$), respectivement, pour la chair et les os. L'analyse des variances (annexe 8) a montré ici, une corrélation positive et non significative entre le poids et la concentration du chrome dans la chair d'une part ($r = 0,99$; $p = 0,08$) et entre le poids et la concentration dans les os d'autre part ($r = 0,97$; $p = 0,15$). En regardant les concentrations dans les organes, nous voyons que la tête et le foie étaient fortement corrélés ($r = 0,94$), de même que la chair et les os ($r = 0,93$). Mais ces deux corrélations, sont respectivement non significatives ($p = 0,21$; pour la tête et le foie) et ($p = 0,23$ pour la chair et les os). Cela signifie que, lorsque le chrome s'accumule dans le foie, il en va de même pour la tête ; même chose entre les os et la chair, mais la tendance n'était pas très forte. L'allure de la concentration dans le foie, restait la même ; plus élevée dans le petit capitaine (7,43 $\mu\text{g/g}$), baisse dans le capitaine moyen (1,60 $\mu\text{g/g}$) et la concentration dans le grand capitaine (7,35 $\mu\text{g/g}$) suivait celle du petit capitaine. La plus petite concentration du chrome (6,10 $\mu\text{g/g}$), dans les capitaines, était dans le foie du capitaine moyen, tandis que la plus grande se trouvait dans les os (353,02 $\mu\text{g/g}$) du grand capitaine.

Les tendances sont inversées dans les machoirons, qui comportaient le plus gros poisson de notre étude (2,464 kg). La concentration du chrome, diminuait dans le foie, la chair et les os avec l'augmentation de l'âge. Elle diminuait de façon continue, du plus petit machoiron au plus grand, de (105,32 à 27,68 $\mu\text{g/g}$ dans les foies), (de 45,33 à 39,76 $\mu\text{g/g}$ dans les chairs) et (de 351,93 à 290,25 $\mu\text{g/g}$ dans les os). Dans les têtes, l'évolution n'était pas la même. L'analyse des variances (annexe 9) a montré une corrélation négative et significative ($r = -0,99$; $p = 0,01$) entre le poids des machoirons et la concentration du chrome dans les os. Cela signifie que, lorsque le poids des poissons augmente, la concentration baisse dans les os. Cette corrélation était également négative mais non significative ($r = -0,99$; $p = 0,05$) entre le poids et le foie. Entre les organes, il y avait une corrélation positive mais non significative entre le foie et les os ($r = 0,99$; $p = 0,07$) d'une part, et entre la tête et la chair d'autre part ($r = 0,99$; $p = 0,07$). Ceci signifie que, lorsque le chrome s'accumule dans le foie, il s'accumule aussi dans les os des machoirons mais de façon non significative. Il en est de même, entre la tête et la chair.

Cette tendance à la diminution de la concentration des métaux lourds, dans les gros poissons, a été soulignée dans les travaux de Medina *et al.*, (1986). Médina *et al.*, qui

expliquaient cela par le fait que ceci serait dû à l'effet de dilution avec la croissance, et l'échange d'ions dans les milieux du poisson.

Dans les têtes, la concentration diminuait de 284,47 à 179,08 µg/g, du petit machoiron au grand machoiron, cependant elle restait plus élevée au niveau du machoiron moyen (287,88 µg/g). La plus petite concentration dans les organes des machoiron a été observée dans le foie du grand machoiron (27,68 µg/g), tandis que la plus grande, dans les os du petit machoiron (351,93 µg/g). Dans toutes les chairs de nos poissons, la concentration du chrome variait de 26,55 à 51,93 µg/g de MS. Nos résultats sont supérieurs à tous ceux dont nous avons pris connaissance dans la littérature scientifique ; à l'état de nos recherches.

Rashed (2001), dans les carpes du Lac Nasser, en Egypte, avait obtenu une moyenne de chrome de 0,29 µg/g de MS. Patrizia *et al.* (2003), dans les différents organes de *Liza aurata*, dans le Lac Ganzirri en Espagne, ont obtenu les valeurs suivantes : chair (0,19-0,42 µg/g), branchies (0,38-0,43) et os (0,020-0,030 µg/g). Altindag *et al.* (2005), dans leurs travaux, en Turquie, sur quatre espèces de poisson du Lac Beysehir, ont obtenu dans la chair et les branchies, respectivement, les moyennes suivantes de concentration de chrome 0,12-0,36 ; 0,14-0,35 µg/g. Durali *et al.* (2005), sur sept espèces de poisson de sept lacs du Tokat ; Aysun *et al.* (2005) sur trois espèces de poisson, en Turquie ; ont respectivement, obtenu des concentrations moyennes dans les plages de 0,6-1,6 et 0,07-6,46 µg/g de MS. Durali *et al.* (2007), toujours en Turquie, cette fois-ci sur cinq espèces de poisson des six lacs du Tokat, ont obtenu les résultats dans la même plage de moyenne (0,6-1,6 µg/g de MS). Enfin Dural *et al.* (2007), en Turquie, étudiant l'évolution de la teneur des métaux lourds dans les différents organes de trois espèces de poisson, dans le temps ; ont fait ressortir l'évolution suivante :

	Automne	Printemps
Chair	0,07-0,09	0,03-0,12
Foie	0,02-0,17	0,10-0,35
Branchies	0,04-1,18	0,70-1,59
Gonades	0,11-0,17	0,11-0,40.

Ces résultats montrent que la variation suivait les saisons. Dans le contexte climatique du Tchad, l'automne (Septembre-Décembre) correspondrait à la période des hautes eaux des fleuves Chari et Logone ; tandis que le printemps (Mars-Juin), serait le moment le plus chaud, donc évaporation et ces fleuves seraient à leur plus bas niveau. Une étude en cette période de basses eaux serait souhaitable.

III-3. Comparaison entre espèces de l'accumulation du chrome dans les organes des trois espèces de poisson du Lac Tchad.

L'analyse des variances inter espèces (annexe 10), au seuil de 95 %, a montré qu'il n'y avait aucune corrélation entre le poids et l'accumulation du chrome dans les organes. En ce qui concerne les organes entre eux, il y avait une corrélation positive et significative ($r = 0,74$; $p = 0,02$) entre la chair et les os. Cela signifie que, entre les espèces, lorsque le chrome s'accumulait dans les os, sa teneur augmentait aussi dans la chair.

En comparant nos résultats à la grille de qualité de Mersch (1993), pour interpréter les concentrations métalliques (en $\mu\text{g/g}$) observées chez *Dreissena polymorpha*, en annexe 11, nous pouvons dire ceci, en ce qui concerne la pollution du Lac Tchad :

- Pour le cadmium, nous avons trouvé une concentration moyenne de $2,18 \mu\text{g/g}$, dans la chair de carpe ; ceci correspond à la classe 2 : situation intermédiaire de pollution ;
- Pour le chrome, dans la chair de tous nos poissons, la concentration allait de $26,55$ à $51,93 \mu\text{g/g}$, donc supérieure à 10 dans cette grille (classe 4) ; cela indique une pollution importante du Lac Tchad ;
- Pour le Pb, la concentration moyenne trouvée, qui était de $5,15 \mu\text{g/g}$, nous indique une pollution certaine (classe 3).

Pour une lecture détaillée de nos résultats, tous les tableaux des différentes corrélations se trouvent en annexe

A titre de comparaison synoptique, nous donnons dans le tableau 18, nos résultats avec ceux obtenus dans d'autres pays du monde. Il est à remarquer que, pour les concentrations exprimées en poids humide du poisson (MF), nos différents calculs donnent la relation presque suivante : $\text{Concentration/MF} = (\text{Concentration en g de MS})/4$ où

MF : matière fraîche ;

MS : matière sèche.

Tableau 18: concentrations des métaux lourds ($\mu\text{g.g}^{-1}$ de M.S.) dans les poissons des eaux de quelques pays.

Auteurs	Eaux et (Pays)	Espèces	n	Pb	Cd	Cr
					Min-max	Min-max
Notre étude (2009)	Lac Tchad (Tchad)	<i>T. nilotica</i> :	3			
		tête		4,76-5,94	10,94-15,14	123,22-192,50
		foie		nd	2,15-16,14	5,57-157,61
		chair		nd	0,00-2,28	26,56-51,93
		os	nd	nd	153,58-258,30	

		<i>L. niloticus</i> :	nd		
		tête	nd	nd	214,74-339,65
		foie	nd	nd	6,10-28,37
		chair	nd	nd	30,57-43,92
		os		nd	167,46-353,02
		<i>A. latiscutatus</i> :	nd		
		tête	nd	nd	
		foie	nd	nd	179,08-287,88
		chair	nd	nd	27,68-105,32
		os		nd	39,76-45,33
					290,25-351,93
Chevreuil et al.(1995)	Seine (France)		2	0,06-8,9	0,03-0,6
Teil et al.(1996)	Seine (France)	Bream	3	5,7	0,7
		Roach		1,2	0,3
		Perche		0,1	0,4
Miramand et al.(1998)	Seine (France)			0,6-1,6	0,013-0,11
Henry et al.(2004)	Mer du nord (France)		4	0,04-0,17 (MF)	0,01-0,23 (MF)
Mazet et al.(2005)	Drome (France)		12	0,01-0,092	0,0092-0,0781
King M.C.(1995)	Victoria Harbour (Hong Kong)	Chair (gills)	1	6,0-40,3	0,6-7,1
		Viscères		40,8-199,5	6,0-33,6
		Colonnes vert.		7,0-98,1	1,4-6,8
				25,5-147,1	1,7-25,4
Herreros et al.(2008)	Méditerranée (Espagne)		2		0,02-0,25 (MF)
Alam et al.(2002)	Lac Kasumigaura (Japon)	<i>C. carpio</i> intestins	1	(mg/kg) :	
		reins		0,030-0,043	0,033-0,108
		foie		0,042-0,043	0,273-0,385
		chair		0,087-0,090	0,009-0,010
		gonades		0,032-0,071	0,007-0,009
				0,029-0,037	0,008-0,009

Chale F. (2002)	Lac Tanganyika (Tanzanie)	<i>L.marie</i>	9	(MF) :	
				4,96	0,25
		<i>L.stappersii</i>		5,03	0,28
		<i>L.miodon</i>		4,64	0,38
		<i>S.tanganicae</i>		4,96	0,39
		<i>Chrsysts</i> spp.		5,30	0,28
		<i>M.spekei</i>		6,60	0,43
		<i>R.moorei</i>		6,10	0,20
		<i>Oreochromis</i> spp.		2,70	0,20
		<i>Alestes</i> sp.	5,30	0,20	
Licata et al.(2003)	Lac Ganzirriat (Italie)	chair	1	(MF) :	
		(gills)		0,28-0,55	0,03-0,09
Bordajandi et al. (2003)	Turia (Espagne)	Trout	3		
		Ell		0,2-0,81	0,02-0,04
		Barbell		0,027	0,0014
Durali et al. (2004)	Lacs Tokat (Turquie)		7	0,7-2,4	0,1-1,2
Aysun et al.(2004)	Baie Iskenderun (Turquie)		3	(mg/kg) :	
Allinson et al.(2002)	Réservoirs (Sri Lanka)	<i>Tilapia</i>	1	0,19-6,95	0,02-4,16
		Filet			0,00-0,50
		foie			0,1-0,60
Gabriela et al.(2005)	Mer Noire (Tomis Harbour)		1	8,92	0,02-1,71
Farkas et al.(2002)	Lac Balaton (Hongrie)		1	0,44-3,24	0,42-2,10

nd : non détecté

Ce tableau récapitule les résultats de certains auteurs auxquels nous avons comparé nos résultats. Nous faisons remarquer cependant que chaque pays a son contexte et rythme de développement particulier : industrialisation, intensification de l'agriculture... ces études comparatives, nous permettent d'exploiter les résultats dans le sens positif, ou certains pays comme le Canada, le Japon ont connu avec le développement, une pollution accrue de leurs rivières, lacs et mers en métaux lourds ; mais en améliorant leurs technologies et en prenant des mesures concertées avec les producteurs agricoles, les industriels, les décideurs, les techniciens toxicologues et de la santé, les associations de défense des droits des consommateurs ; sont arrivés aujourd'hui à réduire considérablement les nuisances et rendre l'environnement agréable à vivre pour leurs citoyens.

Il n'y a pas de solutions miracles à ces problèmes de pollution chimique ou microbiologique (n'ayant pas fait l'objet de notre étude), la solution sera dans le renforcement des capacités nationales et la prise des mesures concertées.

CONCLUSION

Au terme de notre étude dont l'objectif principal était :

D'évaluer la contamination des poissons, des sédiments et des eaux du Lac Tchad par les métaux lourds ;

Les résultats obtenus après analyse de nos échantillons, nous permettent de conclure que :

- Le Lac Tchad et ses poissons (carpes, capitaines et machoïrons) sont contaminés par le cadmium (Cd), le chrome (Cr) et le plomb (Pb);
- Les concentrations de ces métaux lourds dans les poissons, sédiments, et les eaux du Chari, Logone et Lac Tchad sont supérieures aux normes existantes (UE, USA et JECFA FAO/OMS);
- Dans l'eau, la concentration des métaux lourds augmente d'amont (N'Djaména) en aval (Lac Tchad) ;
- Les sédiments contiennent plus de métaux lourds que les eaux ;
- Dans les poissons, en considérant que le foie est jeté avec les viscères, ces métaux dans les parties comestibles se concentrent le plus dans les os, suivis de la tête. La chair est la partie la moins contaminée ;
- Les carpes qui se nourrissent dans les sédiments, concentrent tous les métaux lourds détectés et leurs têtes sont particulièrement contaminées ;
- Dans les plus gros poissons (machoïrons), il y a diminution de la teneur en métaux lourds par rapport aux plus petits.
- La teneur en métaux lourds par poisson montre clairement que la consommation quotidienne des poissons du Lac Tchad, expose les consommateurs à des risques élevés pour leur santé car les teneurs en ces métaux sont au delà des normes précitées. Le risque d'accumulation de ces métaux dans l'organisme est réel et les effets néfastes à craindre.

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS :

Nous avons prévu analyser aussi le mercure (Hg), mais pour des raisons techniques, cela n'a pu être réalisé. Il est très souhaitable que ce métal soit analysé dans les poissons, les sédiments et les eaux des mêmes sites dès que les conditions techniques le permettront.

En perspective, nous disons aussi qu'il est impérieux, de :

- 🚧 refaire ces études aux mois d'Avril-Mai, où les fleuves Chari et Logone, sont à leur plus bas niveau avec le phénomène d'évaporation, afin d'avoir une conclusion

certaine, quant à la contamination de ces eaux et poissons par le Hg qui n'a pas été analysé pour des raisons techniques;

✚ Faire une étude de santé chez les riverains du Lac Tchad qui consomment quotidiennement du poisson, contaminé par le Cr, Cd et le Pb.

Au terme de cette étude, nous recommandons au gouvernement tchadien ce qui suit :

- Intégrer aux cursus des études médicales de la Faculté de santé, de l'Université de N'Djaména, et des autres professions de santé au Tchad, une formation pluridisciplinaire aux problèmes de santé environnementale.
- Mettre en place une filière de récupération des emballages vides et des produits phytosanitaires non utilisés ; plus particulièrement, mener une politique incitative de récupération des piles et batteries usées, sources de cadmium et de plomb ;
- Mettre sur pied, un Organe de contrôle et de surveillance de la qualité des effluents industriels et domestiques, des poissons, l'équiper de moyens adéquats ;
- Créer des stations d'épuration dans les grandes villes ;
- Inciter les usines à la création des stations d'épuration de leurs effluents et inclure dans le cahier de charges des nouvelles usines voulant s'implanter au Tchad, l'installation de station d'épuration et ce, quelque soit l'usine;
- Appliquer le principe de pollueur-payeur et surtout faire obligation à toute usine voulant s'implanter au Tchad de respecter les normes environnementales ;
- Appliquer la réglementation en vigueur en matière de dégradation de l'environnement ;
- Inciter les agriculteurs à choisir les produits efficaces et moins persistants.
- Comparativement aux travaux de Rashed (2001), dans le Lac Nasser en Egypte où les eaux étaient plus contaminées que les sédiments (respectivement de 240 $\mu\text{g/mL}$ et 79 $\mu\text{g/g}$) ; dans le cas de notre étude, c'est la situation contraire. Rashed, expliquait ses résultats en disant qu'il s'agissait d'une pollution récente, parce que la concentration dans les sédiments était inférieure à celle des eaux. Dans notre cas, la situation inverse, sédiments plus contaminés que les eaux, ceci montrerait une pollution ancienne, donc des mesures urgentes doivent être envisagées. C'est pourquoi nous recommandons de :
- Curer le Lac Tchad, après une étude technique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alam M.G.M., Tanaka A., Allinson G., Laurenson L.J.B., Stagnitti F., and Snow E.T., 2002.** Academic Press, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 53: 348–354
- Alexandra Mazet, Gérard Keck, Philippe Berny, 2005.** Concentrations of PCBs, organochlorine pesticides and heavy metals (lead, cadmium, and copper) in fish from the Drome river: Potential effects on otters (*Lutra lutra*). Elsevier, *Chemosphere* 61 : 810–816.
- Allaire Frédéric, 2008.** Disparition du lac Tchad en Afrique. Images NASA, 2002.
- Allinson G., Nishikawa M., De Silva S.S., Laurenson L.J.B. and De Silva K. 2002.** Observations on Metal Concentrations in Tilapia (*Oreochromis mossambicus*) in Reservoirs of South Sri Lanka. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 51: 197-202.
- Altundag Ahmet, Sibel Yigit, 2005.** Assessment of heavy metal concentrations in the food web of lake Beysehir, Turkey. Elsevier, *Chemosphere*, 60: 552–556.
- Analytical methods.1989.** Flame Atomic Absorption Spectrometry, Varian Australia. Revised march 1989.
- Annuaire des statistiques sanitaires du Tchad, 2004.** Tome A, 17^{ème} édition, Aout 2004.
- AOAC.1990.** *Official Methods of Analysis*, 15th edition. Association of official Analytical Chemists, Washington, D. C.
- Armstrong V.C., Holliday M.G. et Schrecker T.F., 1981.** Tap water consumption in Canada. Rapport 82-EHD-80 de la Direction de l'hygiène du milieu, Ministère de la Santé nationale et du Bien-être social, Ottawa.
- Asonye C.C., Okoline N.P., Okenwa E.E. and Iwuanyanwu U.G., 2007.** Some physicochemic characteristics and heavy metal profiles of Nigerian rivers, streams and waterways, *African Journal of Biotechnology*, vol. 6 (5): 617-624
- Aysun Turkmen , Mustafa Turkmen , Yalcin Tepe, Ihsan Akyurt, 2005.** Heavy metals in three commercially valuable fish species from Iskenderun Bay, Northern East Mediterranean Sea, Turkey. Elsevier, *Food Chemistry*, 91: 167–172.
- Baetjer A.M., Damron C. et Budacz V., 1959.** The distribution and retention of Cr in men and animals. *Arch. Ind. Health*, 20: 54.
- Biney C., Amuzu A.T., Calamari D., Kaba N., Mbome I.L., Naeve H. Ochumba O., Osibanjo O., Radegonde V. et Saad M.A.H., 1995.** Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain : Etude des métaux lourds. Archives de documents de la FAO, Département de pêches. Rome.

- Bell A. (1981).** Influence des transformations technologiques traditionnelles sur la valeur nutritive des ignames (*Dioscorea* spp.) du Cameroun. *Thèse de 3ème cycle*, Université Paris.
- Bronzon A. et Breuil C., 1992.** Propriétés pour l'aménagement et la planification du développement des pêches continentales dans la région du sahel. FAO. Rapport sur la pêche n° 481 ; 133 p.
- Bronzon A. et Moschetta G., 1990.** Guide de discussion sur des aspects institutionnels du développement des pêches dans le bassin conventionnel du lac Tchad. Séminaire régionale sur la planification du développement de l'aménagement des pêcheries dans le bassin conventionnel, N'Djaména, 8-12 janvier 1990, 9p.
- Canada, 2001.** Rapport de la commissaire à l'environnement et au développement durable, octobre 2001.
- Castoldi A.F., Coccini T., Manzo L., 2003.** Neurotoxic and molecular effects of methylmercury in humans. *Rev. Environ. Health*, 18: 19–31.
- Cavaco S.A., Fernandes S., Margarida Q.M., Fereira L.M. 2007.** Removal of chromium from electroplating industry effluent by ion exchange resins, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 144: 634-638.
- Chale F.M.M., 2002.** Trace metal concentrations in water, sediments and fish tissue from Lake Tanganyika, Tanzania. Elsevier. *The Science of the Total Environment* 299: 115–121.
- Chanel Olivier, Catherine Dollfus, Jean-Marie Haguenoer, Philippe Hartemann, Guy Huel, Béatrice Laroque, Dominique Lison, Stéphane Marret, Ghislaine Pinon-Lataillade, Joël Prémont, Hubert de Verneuil, Denis Zmirou, 1999.** Expertise collective : *Plomb dans l'environnement : quels risques pour la santé ?* Inserm, Dossier de presse. Paris, le 13 janvier 1999.
- Chen C.Y., Stemberger R.S., Klaue B., Blum J.D., Pickhardt C., Folt C.L., 2000.** Accumulation of heavy metals in food web components across a gradient of lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 45 (7): 1525–1536.
- Chen M.-H., Chen C.-Y., 1999.** Bioaccumulation of sediment bound heavy metals in grey mullet, *Liza macrolepis*. *Mar. Pollut. Bull.*, 39 (1–12): 239–244.
- Chrétien J. et Thieblemont M., 1974.** Un mécanisme intermédiaire dans la carcinogénèse pulmonaire. *Nouv. Presse Med.*, 3: 1347.
- CIRC (Centre international de recherche sur le cancer). 1982.** IARC Monogr. Eval. Carcinog. *Risk Chem. Man*, Suppl. 4: 91.
- Clarkson T.W., Magos L., 2006.** The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Crit. Rev. Toxicol.*, 36: 609–662.

- Cogbill E.C. et Hobbs M.E., 1957.** Transfer of metallic constituents of cigarettes to the main-stream smoke. *Tobacco Sci.*, 144: 68.
- Connett Ph, Wetterhahn K.E., 1983.** Metabolisms of the carcinogen chromate by cellular constituents structure. *Bond* 54 : 93-124
- Côté M. et Coll, 1985.** Hair chromium concentration and coronary artery disease in Canada, France, Spain and Italy. *Nutr. Res.*, Suppl. I: 356.
- Daget J., Gaigher I. C. et Ssentongo G. W., 1988.** Conservation. In : LLeveque C., Bruton M. N. Et Ssentongo G. W. *Biologie et écologie des poissons d'eau douce africains*. pp 481-490.
- Dallinger R., Prosi F., Segner H., Back H., 1987.** Contaminated food and uptake of heavy metals by fish: a review and a proposal for further research. *Oecologia* (Berlin) 11 : 77–87.
- Danel V., 1997.** Intoxication par le plomb, physiopathologie, épidémiologie, diagnostic.
- Danielsson B.R.G., Hassoun E. et Dencker L., 1982.** Embryotoxicity of chromium: distribution in pregnant mice and effects on embryonic cells *in vitro*. *Arch. Toxicol.*, 51: 233.
- Davydova S., 2005.** Heavy metals as toxicants in by cities, *Microchemical Journal*, vol. 79: 133-136.
- Dauids H.W. et Lieber M., 1951.** Underground water contamination by chromium wastes. *Water Sewage Works*, 98: 528.
- De Flora S., Wetterhahn Ke., 1990.** Mechanisms of chromium metabolism and genotoxicity. *Life Chem Resp*, 2 : 78-84
- Diop M.B., 2008.** Sélection et caractérisation de souches bactériennes aptes à améliorer la technique de conservation des poissons par salaison au Sénégal. *Thèse de Doctorat*, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique, 213 p.
- Diouf P.S., 1996.** Les peuplements de poissons des milieux estuariens de l'Afrique de l'Ouest : L'exemple de l'estuaire hyperhalin du sine-saloum. Université de Montpellier II. Thèses et documents microfiches N° 156. ORSTOM, Paris. 267p.
- Directive 2000/60/CE** du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Mis en ligne le 22 décembre 2000, consulté le 08 janvier 2009.
- Donaldson R.M. Jr., et Barreras R.F., 1966.** Intestinal absorption of trace quantities of chromium. *J. Lab. Clin. Med.*, 68: 484.
- Dural Meltem, Ziya Lugal Goksu M. and Argun Akif Ozak, 2007.** Investigation of heavy metal levels in economically important fish species captured from the Tuzla lagoon. ScienceDirect, Elsevier. *Food Chemistry*, 102: 415-421.

- Durali Mendil, Ozgür Do an Uluözlü, Erdogan Hasdemir, Mustafa Tüzen, Hayati Sari and Menderes Suiçmez, 2005.** Determination of trace metal levels in seven fish species in lakes in Tokat, Turkey. *Food Volume* 90, Issues 1-2, March-April 2005, Pages 175-179.
- Durali Mendil, Ozgur D.U., 2007.** Determination of trace metal levels in sediment and five fish species from lakes in Tokat, Turkey. *Food Chemistry*, volume 101, Issue 2: 739-745.
- Durand J. R., 1983.** The exploitation of fish stocks in the lake Chad region. Lake Chad: Ecology and productivity of shallow tropical ecosystem. In Carmouze J.-P, Durand J.R. and Lleveque C.(éd.). *Monogr. Biol.*, 53: 425-481.
- Durum W.H. et Haffty J., 1961.** Occurrence of minor elements in water. U.S. Geol. *Surv. Circ.* No. 445.
- Elmer P., 1994.** Analytical methods for atomic absorption spectrometry. The Perkin elmer corporation, U.S.App.
- Elvevol D. et James D., 2000.** Avantages potentiels du poisson pour la nutrition maternelle, foetal et néonatale : examen de la littérature à ce sujet. In : *Alimentation, Nutrition et Agriculture*, 28-37.
- Environnement, Risques & Santé., 2002.** Volume 1, Numéro 1, 42-9.
- FAO.1997.** Production par pays de poisson (en tonnes) d'eau douce de 1965 à 1993. FAOSTAT Data base Result, N° 343 Records.
- Farkas Anna, Janos Salanki, Andras Specziar, 2003.** Age and size-specific patterns of heavy metals in the organs of freshwater fish *Abramis brama* L. populating a low-contaminated site. Pergamon, *Water Research*, 37 : 959–964.
- Finklea, J.F. 1976.** Lead chromate — an update. Lettre du 8 octobre 1976 envoyée par le U.S. Department of Health, Education and Welfare/National Institute for Occupational Safety and Health.
- FishBase, 2004.** Queensland Department of Primary Industries and Fisheries.
- Forstner U., Wittmann G.T.W., 1983.** Metal Pollution in Aquatic Environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 486.
- Fresenius W., Schneider W., 1990.** Technologie des eaux résiduaires, Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Springer-Verlag 1990.
- Friberg L. et coll., 1979.** Chromium. Dans: Handbook on the toxicology of metals. Elsevier, *North-Holland Biomedical Press*, Amsterdam.
- Gabriela Stanciu, Magdalena Mititelu, Simona Gutaga, 2005.** Pesticides and Heavy Metals Determination in Marine Organisms from Black Sea. *Chem. Bull. "POLITEHNICA"* Univ. (Timișoara), Volume 50 (64): 1-2.

- Gentile J.M., Hyde K. et Schubert J., 1981.** Chromium genotoxicity as influenced by complexation and rate effects. *Toxicol. Lett.*, 7: 439.
- Gibson R.S. et Scythes C.A., 1984.** Chromium, selenium, and other trace element intakes of a selected sample of Canadian premenopausal women. *Biol. Trace Elem. Res.*, 6: 105.
- Gigon Fernand, 1975.** Le 400ème chat ou Les pollués de Minamata, édition Robert Laffont.
- Harte J., Holdren C., Schneider R., Shirley C., 1991.** Toxics A to Z, A Guide to Everyday Pollution Hazards. *University of California Press*, Oxford, England, p. 478.
- Herrerros M.A., Inigo-Nunez S., Sanchez-Perez E., Encinas T., Gonzalez-Bulnes A., 2008.** Contribution of fish consumption to heavy metals exposure in women of childbearing age from a Mediterranean country (Spain). Elsevier. *Food and Chemical Toxicology*, 46: 1591–1595.
- Hilmy A.M., Badawi H.K., Shabana M.B., 1983.** Organochlorine pesticide residues in 12 freshwater Egyptian fish species with special emphasis on *Anguilla vulgaris* and *Mugil cephalus*. *Fac. Sci.*, 76C (1): 163–171.
- Hopson A., 1972.** A Study of the Nile Perch (*Lates niloticus* (L.) Pisces: Centropomidae) in Lake Chad. Foreign and commonwealth office overseas development administration. *Overseas Research Publication*, 19: 1-90.
- IARC. 1990.** Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Chromium, nickel and welding. *IARC Lyon* 40.
- Iltis A., 1975.** L'ensemble Yaérés-Bas Chari- lac Tchad et la production piscicole au Tchad. Notes techniques du centre ORSTOM de N'djaména N° 1, janvier 1975.
- Iman Al-Saleh, Neptune Shinwari, 2002.** Preliminary report on the levels of elements in four fish species from the Arabian Gulf of Saudi Arabia. Pergamon, *Chemosphere*, 48 : 749–755.
- Islam E., Yang X.E., He Z.L., Mahmood Q., 2007.** Assessing potential dietary toxicity of heavy metals in selected vegetables and food crops. *J. Zhejiang Univ. Sci.*, B 8 : 1–13.
- Jobin Paul, 2006.** Maladies industrielles et syndicats au Japon, éditions de l'EHESS.
- Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), 2000.** Safety evaluation of certain food additives and contaminants. *WHO Food Additives series*, vol. 44: 273-312.
- Kalay M., Canlı M., 2000.** Elimination of essential (Cu and Zn) and non-essential (Cd and Pb) metals from tissue of a freshwater fish, *Tilapia zilli*. *Tr. J. Zool.*, 24: 429–436.
- Kalfakakour V., Akrida-Demertzi K., 2000.** Transfer factors of heavy metals in aquatic organisms of different trophic levels. In: *HTML Publications*, 1: 768-78.
- Kawanishi S., Inoue S., Sano S., 1986.** Mechanism of DNA cleavage induced by sodium

chromate (VI) in the presence of hydrogen peroxide. *J Biol Chem*, 261: 5952-5958

King Ming Chan, 1995. Concentrations of Copper, Zinc, Cadmium and Lead in Rabbitfish (*Siganus oramin*) Collected in Victoria Harbour, Hong Kong, China. Pergamon, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 31, Nos 4—12 : 277-280.

Laboratory Chemicals, 1984. Riedel-de Haen.

Lafaurie M., Miramand P., Guary J.C., Fowler S.W., 1981. Concentration variations of copper, iron, zinc, manganese, cadmium and vanadium in the principal organs of *Mullus barbatus* Linne in the sexual cycle. Preliminary results. *J. Etud. Pollut. Mar. Mediterr* 5th Meeting Date, 373–376.

Lafaurie M., 1982. Significance of the seasonal sexual cycle in the study of metallic pollutants in the red mullet, *Mullus barbatus* L. *Med. Biol. Environ.*, 10 (2): 42–48.

Les Guides Ecofinance, 2006. Tchad : le pays et son potentiel économique, CIDCOM, groupe jeune Afrique.

Levander O.A., 1975. Selenium and chromium in human nutrition. *J.Am.Diet.Assoc.*, 66: 338.

Lexique français-anglais, anglais-français. Paris La Défense, AFNOR, 1994.- 307 p

Lidsky T.I., Schneider J.S., 2003. Lead neurotoxicity in children: basic mechanisms and clinical correlates. *Brain* 100: 284–293.

Love R. M., 1970. *The Chemical Biology of Fishes*. Academic Press, London.

Majone F. et Rensi D., 1979. Mitotic alterations, chromosome aberrations and sister chromatid exchanges induced by hexavalent and trivalent chromium on mammalian cells *in vitro*. *Caryologia*, 32: 379.

Mautner G. et Dinoeua S., 1974. The content of hexavalent chromium in water sources and its effect on the development of experimental atherosclerosis in warm blooded animals. *Gig. Sanit.*, 39: 78.

Maynard A. J., 1970. *Methods in food analysis. Physical, chemical and instrumental methods of analysis*. 2nd edition. Academic press N. Y., San Francisco. London. 845 p.

McDonald R.A., 1985. Water treatment technology review: control of chemical contaminants. Mandaté par le Ministère de la Santé nationale et du Bien-être social à M.R.2 — McDonald & Associates (version préliminaire).

Medina F., Hernandea M., Pastor A., 1986. Determination of trace elements in fish tissues by standard addition method. *Atom. Absorpt. Newsl.*, 14:49.

Mergler D., Anderson H.A., Chan L.H., Mahaffey K.R., Murray M., Sakamoto M., Stern A.H., 2007. The panel on health risks and toxicological effects of methylmercury. Methylmercury exposure and health effects in humans: a worldwide concern. *Ambio*, 36: 3–11.

Merle Alain, Nadia Baskali, Pierre Lanteri, Nambatingar Ngaram, 2007. L'environnement au Tchad.

Mersch J., 1993. Modalités d'utilisation de la moule zébrée *Dreissena polymorpha* en tant qu'indicateur biologique de la contamination des écosystèmes d'eau douce par les métaux lourds – comparaison avec un autre type d'organismes sentinelles, les mousses aquatiques. *Thèse de doctorat*, Université de Metz, 231 p.

Mertz W., 1969. Chromium occurrence and function in biological systems. *Physiol.Rev.*, 49: 163.

Mertz W., 1974. Newer essential trace elements, chromium, tin, vanadium, nickel and silicon. *Proc. Nutr. Soc.*, 33: 307.

Mertz W., 1976. Chromium and its relation to carbohydrate metabolism. *Med. Clin. North Am.*, 60: 739.

NAQUADAT, Canada.1985. Bases de données nationales sur la qualité des eaux. Direction de la qualité des eaux, Direction générale des eaux intérieures, *Environnement Canada*, Ottawa.

NRCC, Canada. Conseil national de recherches du Canada.1976. Effects of chromium in the Canadian environment. NRCC no 15017, Comité associé pour les critères scientifiques de qualité de l'environnement, Ottawa.

Ogari J., 1984. Distribution, Food and Feeding Habits of *Lates niloticus* in Nyanza Gulf of Lake Victoria (Kenya). *FAO Fisheries Report*, 335: 68-80.

O'Heany J.M., 1986. Summary of health effects of chromium. Health Studies Service, Special Studies and Services Branch, Ontario Ministry of Labour.

Okwonko J.O., Mothiba M, 2005. Physico-chemical characteristics and pollution levels of heavy metals in the rivers in Thohoyandou, South Africa, *Journal of Hydrology*, vol 308: 122-127.

OMS, 1984. Guidelines for drinking water quality. Vol. 2: Health criteria and other supporting information. Ch. 6. Genève.

Oualbadet Magomna, 1997. Evolution de la gestion des pêches dans les eaux intérieures en Afrique intertropicale. Une analyse comparative. *Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie, option halieutique*. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (ENSAR).

Patrizia Licata, Giuseppa Di Bella, Giacomo Dugo, Francesco Naccari, 2003. Organochlorine pesticides, PCBs and heavy metals in tissues of the mullet *Liza aurata* in lake Ganzirri and Straits of Messina (Sicily, Italy). Pergamon, *Chemosphere*, 52 : 231–238.

- PERRIN Jeanne, 2007.** Infertilité masculine et exposition professionnelle. Laboratoire de Biologie de la Reproduction, AP-HM La Conception, Laboratoire de Biogénotoxicologie et Mutagenèse environnementale, Faculté de Médecine de Marseille. 27 mars 2007.
- Petrilli F.L. et De Flora S., 1978.** Oxidation of inactive trivalent chromium to the mutagenic hexavalent form. *Mutat. Res.*, 58: 167.
- PICOT André, 2002.** Expert européen de toxicologie. Le trio mercure, plomb, cadmium. Les métaux lourds : de grands toxiques.2002.
- Pillièrre F., 2007.** Département Etudes et assistance médicales, INRS.Tableaux de maladies professionnelles. *Journal Officiel* n° 291 du 15 Décembre 2007.
- Raffetto G. et coll., 1977.** Direct interaction with cellular targets as the mechanism for chromium carcinogenesis. *Tumori*, 63: 503.
- Ramade F., 1992.** Précis d'écotoxicologie, Collection d'écologie 22, Masson.
- Rapport n° 261 du Sénat français, 2001.** Déposé le 5 avril 2001. Rapport n° 2979, Assemblée nationale, 2001.
- Rashed M.N., 2001.** Monitoring of Environmental heavy metals in fish from Nasser Lake, Egypt. *Environment International* 27: 27-33.
- Saner G. et Gunson C.T., 1976.** Hair chromium concentration in newborns and their mothers. *Nutr. Rep. Int.*, 14: 155.
- Schoeters G., Den Hond E., Zuurbier M., Naginiene R., Van den Hazel P., Stilianakis N., Ronchetti R., Koppe J.G., 2006.** Cadmium and children: exposure and health effects. *Acta Paediatr.* 95 (Suppl.), 50–54.
- Schroeder H.A., Balassa J.J. et Tippon I.H., 1962.** Abnormal trace metals in man: chromium. *J. Chronic Dis.*, 15: 941.
- Schroeder H.A., Nason A.P. et Tipton I.H., 1970.** Chromium deficiency as a factor in atherosclerosis. *J. Chronic Dis.*, 23: 123.
- Schroeder D.C. et Lee G.F., 1975.** Potential transformations of chromium in natural waters. *Water Air Soil Pollut.* 4: 355.
- Schuurmann G., Markert B., 1998.** Ecotoxicology, Ecological Fundamentals, Chemical Exposure, and Biological Effects. John Wiley & Sons Inc. and Spektrum Akademischer Verlag, 900.
- Scudder T. et Conelly T., 1985.** Systèmes d'aménagement de la pêche fluviale. *FAO, Doc. Tech. Pêche*, 263:63p.
- Shi X, Dalal Ns. 1990.** On the hydroxy radical formation between hydrogen peroxide and biological generated chromium (V) species. *Arch Biochem Biophys*, 277: 342-350.

- Simonoff M. et coll., 1984.** Low plasma chromium in patients with coronary artery and heart diseases. *Biol. Trace Elem. Res.*, 6: 431.
- Snow E.T, Costa M., 1998.** Nickel toxicity and carcinogenesis. In: *Environmental and occupational medicine*, ROM.W.N. Lippincott-Raven, Philadelphia USA 1998:1057-1064
- Stansby M.E., 1962.** Proximate composition of fish. In: E. Heen and R. Kreuzer (ed.) *Fish in nutrition*, Fishing News Books Ltd., London, 55-60.
- Stocks P., N.B.E.C.C., 1972.** *Annu. Rep.*, 35: 95 (1957). Cité dans Williams, D.R. Metals, ligands, and cancer. *Chem. Rev.*, 72: 203.
- Synergie entre pollens et polluants chimiques de l'air, 2002.** Les risques croisés, *Environnement, Risques & Santé*. Volume 1, Numéro 1, 42-9, Mars - Avril 2002, Synthèses.
- Tariq J., Jaffar M. and Ashraf M., 1991.** Trace metal concentration, distribution and correlation in water, sediments and fish from the Ravi river, Pakistan, *Fisheries Research* 19: 131-139.
- Tchad, 1994.** Ministère de l'Agriculture et de l'environnement, 1994. Actes du séminaire national sur la pêche au Tchad. N'Djaména du 31 mai au 1^{er} juin 1994, 43p.
- Tchad, 2000.** Projections de la population du Tchad de 2000 à 2050, Ministère du plan, 121 pages.
- Tchad, 2005.** Profil National du Tchad sur la gestion des produits chimiques. Ministère de l'Environnement et de l'Eau (MEE). Tchad, UNITAR, deuxième version. Décembre 2005.
- U.E., 2006.** Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006, at Brussels, setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. For the Commission, *Markos KYPRIANOU*, Member of the Commission. *Official Journal of the European Union* L 364/5. 20.12.2006
- Unlu E., Gumgum B., 1993.** Concentrations of copper and zinc in fish and sediments from the Tigris river in Turkey. *Chemosphere*, 26 (11): 2055–2061.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1977.** Manual of treatment techniques for meeting interim primary drinking water regulations. Document EPA-600/8-77-005, Municipal Environment Research Laboratory, Water Supply Research Division, Office of Research and Development, Cincinnati, OH.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1985.** Health effects criteria document for chromium. Criteria and Standards Division, Office of Drinking Water, Washington.
- U.S. Food and Nutrition Board, 1980.** Recommended daily allowances. 9th rev. edition. National Academy of Sciences, Washington, DC.
- Vandecasteele C. et Block C. B., 1991.** Modern methods for trace element determination. New York : John Wiley & sons Inc., pp 259.
- Veena B., Radhakrishnan C.K., Chacko J., 1997.** Heavy metal induced biochemical effects in an estuarine teleost. *Indian J. Mar. Sci.*, 26: 74–78.

Weiler R.R. et Chawla V.K., 1969. Dissolved mineral quality of Great Lakes waters. Dans: Proc. 12th Conf. on Great Lakes Research. p. 801.

Wiegand Hj., Ottenwalder H., Solt Hm., 1984. The reduction of chromium (VI) to chromium (III) by glutathione: an intracellular redox pathway in the metabolism of the carcinogen chromate. *Toxicology*, 33: 341-348

WEBOGRAPHIE

<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&définition=369>. Dernière mise à jour de cette page le 26 janvier 2008 à 05:05. Consultée le 23 Décembre 2008.

http://europa.eu.int/comm/entreprise/reach/index_fr.htm. Dernière mise à jour de cette page le 14 août 2008 à 18:55. Consultée le 23 Décembre 2008.

<http://www.ifremer.fr/delec-en/projects/bioaccumulation/bioconcentration.htm>. Dernière mise à jour de cette page le 28 septembre 2008 à 20:21. Consultée le 23 Décembre 2008.

<http://ifremer.fr/delec-en/projets/bioaccumulation/bioamplification.htm>. Dernière mise à jour de cette page le 28 septembre 2008 à 20:21. Consultée le 23 Décembre 2008.

Canada, 2001. Rapport de la commissaire à l'environnement et au développement durable, octobre 2001. <http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/docs/c101sec2f.pdf>. Mise à jour le 02 Octobre 2001 ; consulté le 20 Décembre 2008.

FishBase, 2004. "*Lates niloticus*, Nile perch" (On-line). FishBase. Accessed 06/08/04 at <http://www.fishbase.org/Summary/SpeciesSummary.cfm?genusname=Lates&speciesname=nioticus>. Consulté le 09/02/2009.

<http://www.dpi.qld.gov.au/fishweb/2374.html>. Mise en ligne, le 1er Novembre 2002, consulté le 09/02/2009.

<http://www.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/>. Consulté le 09/02/2009.

Degrémont Sixth, Edition Lenntech, Traitement et Purification de l'Eau, France. http://lenntech.com/français/feedback_fr.htm. Consulté le 09/02/2009.

The international fish trade and world fisheries, <http://www.fao.org/newsroom/common/ecg/1000301/en/enfactsheet2.pdf>

Encyclopédie scientifique en ligne. Dernière mise à jour Mercredi 24 Décembre 2008. Consultée le 08/01/2009.

Myers P.R., Espinosa C.S., Parr T., Jones G. S., Hammond and Dewey T.A., 2008. The Animal Diversity Web (online). Consulté le 09/02/2009. <http://animaldiversity>.

ANNEXES

Annexe 1: Identification des sources de pollution au Tchad.

SOURCE	TYPE DE POLLUTION
Industrie	Pollution sans traitement
Imprimerie (IDT)	composés organiques et métaux lourds,
Abattoirs	matières organiques et phosphore
Huilerie Cotontchad	Na ₂ SO ₄ , Ca ₃ (PO ₄) ₂ , acides gras, aldéhydes, cétones, glycérine...
Centrales thermiques, STEE	métaux lourds, acides, huile, produits alcalins et ammoniacque
Brasseries, sucreries et fabricants d'eau minérale	matières organiques solubles, matières en suspension insolubles, soude et acide nitrique
Fabrication de savon à partir d'huile de coton	agents anticalcaires, phosphate et de la glycérine
Fabrication de tissus à partir du coton	matières décantables, colorants, métaux lourds, hydrocarbures, composés organochlorés, agents de surface/détergents à un pH alcalin
Production de pétrole	métaux lourds, des hydrocarbures, phénol, azote ammoniacal, les molécules organiques lourdes (asphaltites), etc.

Source : Merle *et al.*, (2007)

Annexe 2: Aperçu des secteurs industriels et agricoles du Tchad.

Secteur	Contribution au PIB (%)	Nombre d'employés	Produits principaux dans chaque secteur
Industrie/fabrication	13,5	34 426	Coton, fibre, savon, huile, tourteaux, sucre, gomme arabique, bière, boissons gazeuses, cigarettes, tôles, cuirs, montages de cycles, peintures, eau, électricité
Exploitation minière et extraction	40,9	2500	Or, pétrole brut, natron, gravier, sable, terre
Agriculture	28,6	1 903 492	Pénicillaire, bérébéré, sorgho, maïs, riz,

Elevage	14	blé, fonio, arachide, sésame, karité, pois de terre, niébé, haricots, manioc, patate douce, taro, tomates, oignons, ails, gombos, piments, dattes, mangues, goyaves, melons et autres fruits
Sylviculture et pêches	3	Bovins, ovins, caprins, équins, camelins, porcins, volailles
Total		Poissons frais, séchés ou fumés
		1 941 674

Source : P.F.S.C (2005)

Annexe 3: Quantités des produits chimiques utilisés au Tchad, par secteur d'activité.

Type de produit chimique	Nombre de tonnes utilisées dans le pays
Pesticides agricoles	18 080 tonnes/an
Pesticides-santé publique	4047 L/an
Pesticides lutte acridienne	94 898 L/an
Engrais	92 113 tonnes/an
Essence	26 165 m ³ /an
PRODUITS CHIMIQUES INDUSTRIELS UTILISES PAR LA SOCIETE TCHADIPEINT	
Calcaire	100 tonnes/an
Résines synthétiques	36 tonnes/an
Oxyde de fer	1,2 tonnes/an
Oxyde de titane	6 tonnes/an
Oxyde de chrome	600 kg/an
Oxyde de zinc	Trace
White spirit	7200 L/an
Xylène	400 L/an
Toluène	400 L/an
Texanole	500 L/an
Phosphate de sodium	Trace
Benzoate de sodium	Trace
Ammoniac	2,5 L/an
Cykatif (de plomb, de cobalt et de calcium)	250 kg/an
Accyte	300 L/an
QUANTITES DE MERCURE CONSOMMEES DANS LES PRODUITS DE BEAUTE ET TOILETTE	
Jaribu , 200 g/unité dont 2% HgI ₂	898,42 kg/an de Hg
Mekako , 225 g/unité dont 2% HgI ₂	397,54 kg/an de Hg
Movate , 100 g/unité dont 2% Hg et 5% sel de Hg	192,745 kg/an de Hg
Total : 1488,705 kg/an de Hg	
PRODUITS CHIMIQUES INDUSTRIELS UTILISES PAR LA CST	
Soude	20 tonnes/an
Bicarbonate de sodium	3 tonnes/an
Praestol (floculant)	13 tonnes/an
Chaux	9000 tonnes/an
Sulfate d'aluminium	3,5 tonnes/an
Charbon actif	60 tonnes/an
Cellulose	76 tonnes/an

Pâte cellulosique	14 tonnes/an
Urée	625,15 tonnes/an
DAP (18% N + 46% P ₂ O ₅)	350,15 tonnes/an
SA (sulfate d'ammonium)	825,8 tonnes/an
KCl	229,75 tonnes/an
Atrazine (herbicide)	3 840 L
Stomp (herbicide)	4 371 L
Velpar (herbicide)	1,05 tonne
Diuron (herbicide)	3 657 L
Asulox (herbicide)	3 101 L
Certrol DS (herbicide)	1 240 L
2,4-D (herbicide)	4 322 L
Sencor (herbicide)	0,24 tonne
Round up (herbicide)	2 297 L
Fusilade (herbicide)	542 L

PRODUITS CHIMIQUES INDUSTRIELS UTILISES PAR LES BDL

Septacide	2,3 tonnes/an
Alcamix	10 tonnes/an
DT 6	2,3 tonnes/an
Microsept 2B	900 kg/an
Triphosphate de sodium	900 kg/an
Metaschiccate de soude	900 kg/an

PRODUITS CHIMIQUES INDUSTRIELS UTILISES PAR LES EAUX MINERALES ZAMZAM

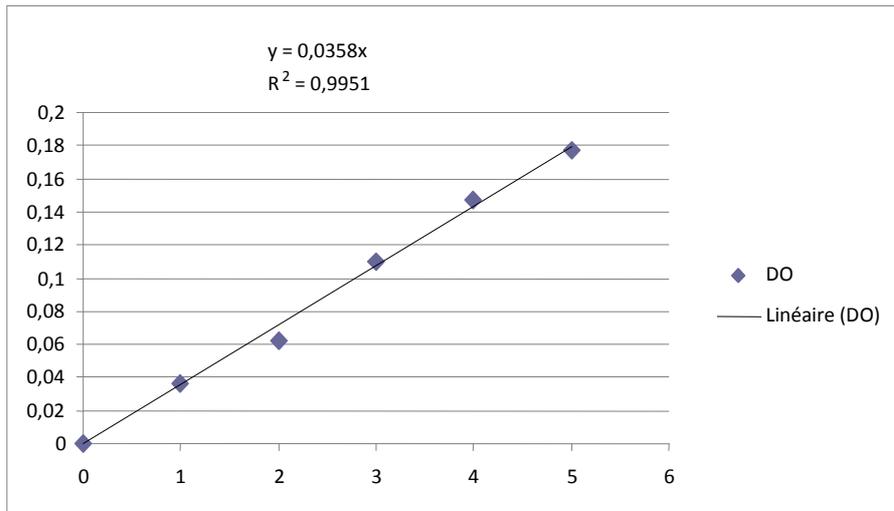
NaCl	2,6 tonnes/an
------	---------------

AUTRES

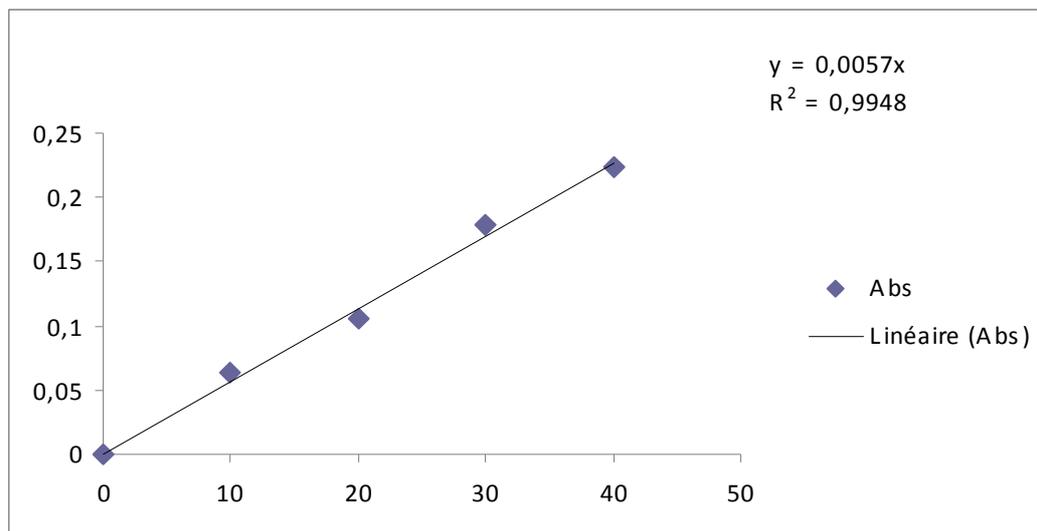
Matières colorantes organiques	1,8-8,7 tonnes/an
Peintures et vernis à base de polymères synthétiques	0,9-1 tonnes/an
Autres peintures et vernis	6,7-8,9 tonnes/an
Pigments	0,9-4,2 tonnes/an
Couleur pour la peinture artistique, l'enseign.	1,8-5,6 tonnes/an
Mastic et vitriers	25,7-27,1 tonnes/an
Encres d'imprimerie	10,6-27,2 tonnes/an
Préparations chimiques pour usages photographiques	4,6-24 tonnes/an
Huiles de vidange (N'Djaména)	520 958 L
CFC	32 tonnes
Piles et batteries usées (N'Djaména)	11 946 unités
Eaux pour lavage des engins	14 766 m ³
Essence pour lavage des engins	124 m ³
Détergent pour lavage des engins	50,3 tonnes
Déchets plastiques	174 532,05 tonnes
Déchets ménagers	292 000 tonnes

Source : Rapports INSEED, BGT, BDL, CST, P.F.S.C, MEE, Direction des Douanes, 2004.

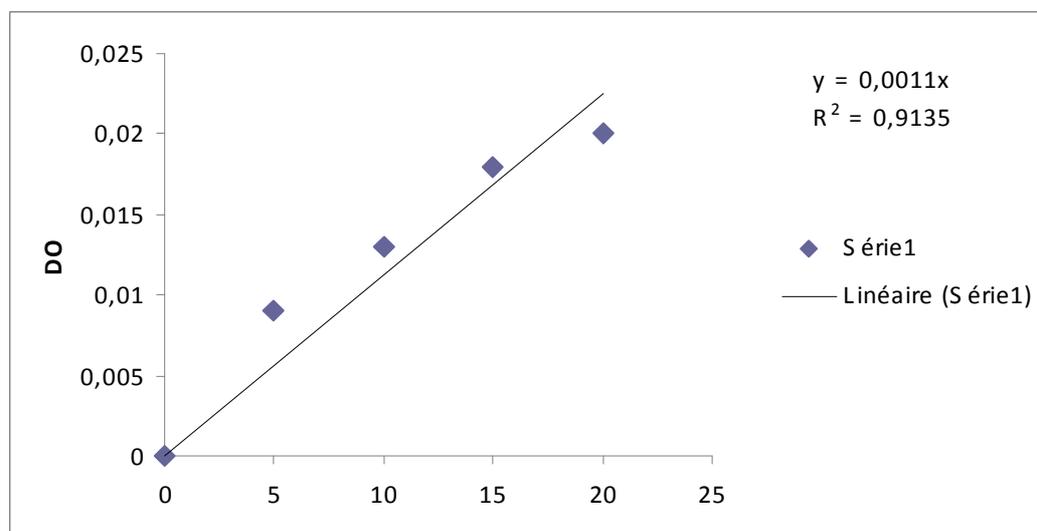
Annexe 4 : Les courbes d'étalonnage des métaux lourds



Courbe d'étalonnage du cadmium.



Courbe d'étalonnage du plomb.



Courbe d'étalonnage du Chrome

Annexe 5 : Ensemble de filtration sur membrane de cellulose utilisé et photo d'une membrane.



Photo ensemble de filtration

Photo membrane de cellulose

Annexe 6 : Test de Duncan entre les différents sites étudiés.

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	38, 7943	5	7, 75887	6,50	0,0038
Within groups	14, 3303	12	1, 19419		
Total (Corr.)	53, 1246	17			

Lorsque la valeur de p du F-test est inférieure à 0,05 ; il existe une différence significative entre les variables observées au seuil de 95 %.

Multiple-Sample Comparison

Contrast	Difference	+/- Limits
ND1 - ND2	*-3,43333	1,94407
ND1 - MN 2	*-3,17	1,94407
MN1 - ND2	*-3,36	1,94407
MN1 - MN 2	*-3,09667	1,94407
LC1 - ND2	*-3,35667	1,94407
LC1 - MN 2	*-3,09333	1,94407

* signifie qu'il y a une différence significative.

Annexe 7: Corrélation entre la concentration du chrome dans les différents organes et les poids des Carpes.

Corrélations :

	POIDS	TETE	FOIE	CHAIR	OS
POIDS		0,9994 (3)	-0,5574 (3)	0,9413 (3)	0,9732 (3)
		0,0229	0,6236	0,2192	0,1477
TETE	0,9994 (3)		-0,5868 (3)	0,9286 (3)	0,9808 (3)
		0,0229	0,6008	0,2421	0,1248
FOIE	-0,5574 (3)	-0,5868 (3)		-0,2443 (3)	-0,7333 (3)
		0,6236	0,6008	0,8429	0,4759
CHAIR	0,9413 (3)	0,9286 (3)	-0,2443 (3)		0,8384 (3)
		0,2192	0,2421	0,8429	0,3669
OS	0,9732 (3)	0,9808 (3)	-0,7333 (3)	0,8384 (3)	
		0,1477	0,4759	0,3669	

Correlation

(Sample Size)

P-Value

Lorsque la valeur de p du F-test est inférieure à 0,05 ; il existe une différence significative entre les variables observées au seuil de 95 %.

Annexe 8: Corrélation entre la concentration du chrome dans les différents organes et les poids des Capitaines.

Corrélations :

	POIDS	TETE	FOIE	CHAIR	OS
POIDS		0,4142 (3)	0,0815 (3)	0,9907 (3)	0,9723 (3)
		0,7281	0,9481	0,0867	0,1503
TETE	0,4142 (3)		0,9409 (3)	0,5339 (3)	0,1898 (3)
		0,7281	0,2199	0,6415	0,8784

FOIE	0,0815 (3)	0,9409 (3)		0,2160 (3)	-0,1539 (3)
	0,9481	0,2199		0,8614	0,9017
CHAIR	0,9907 (3)	0,5339 (3)	0,2160 (3)		0,9315 (3)
	0,0867	0,6415	0,8614		0,2369
OS	0,9723 (3)	0,1898 (3)	-0,1539 (3)	0,9315 (3)	
	0,1503	0,8784	0,9017	0,2369	

Correlation

(Sample Size)

P-Value

Lorsque la valeur de p du F-test est inférieure à 0,05 ; il existe une différence significative entre les variables observées au seuil de 95 %.

Annexe 9 : Corrélation entre la concentration du chrome dans les différents organes et les poids des machoirons.

Corrélations :

	POIDS	TETE	FOIE	CHAIR	OS
POIDS		-0,8005 (3)	-0,9956 (3)	-0,8677 (3)	-0,9996 (3)
		0,4092	0,0597	0,3312	0,0178
TETE	-0,8005 (3)		0,7408 (3)	0,9925 (3)	0,8169 (3)
		0,4092	0,4689	0,0779	0,3914
FOIE	-0,9956 (3)	0,7408 (3)		0,8173 (3)	0,9926 (3)
		0,0597	0,4689	0,3910	0,0776
CHAIR	-0,8677 (3)	0,9925 (3)	0,8173 (3)		0,8812 (3)
		0,3312	0,3910		0,3134
OS	-0,9996 (3)	0,8169 (3)	0,9926 (3)	0,8812 (3)	
		0,0178	0,0776	0,3134	

Correlation

(Sample Size)

P-Value

Lorsque la valeur de p du F-test est inférieure à 0,05 ; il existe une différence significative entre les variables observées au seuil de 95 %.

Annexe 10 : Corrélation entre le chrome dans les différents organes et les poids des carpes, des capitaines et des machoirons.

Corrélations :

	POIDS	TETE	FOIE	CHAIR	OS
POIDS		0,0875 (9)	-0,4623 (9)	0,3807 (9)	0,4265 (9)
		0,8229	0,2102	0,3121	0,2524
TETE	0,0875 (9)		-0,2381 (9)	0,4470 (9)	0,5724 (9)
		0,8229	0,5373	0,2277	0,1072
FOIE	-0,4623 (9)	-0,2381 (9)		-0,0399 (9)	-0,2045 (9)
		0,2102	0,5373	0,9189	0,5977
CHAIR	0,3807 (9)	0,4470 (9)	-0,0399 (9)		0,7452 (9)
		0,3121	0,2277	0,9189	0,0212
OS	0,4265 (9)	0,5724 (9)	-0,2045 (9)	0,7452 (9)	
		0,2524	0,1072	0,5977	0,0212

Correlation

(Sample Size)

P-Value

Lorsque la valeur de p du F-test est inférieure à 0,05 ; il existe une différence significative entre les variables observées au seuil de 95 %.

Annexe 11 : Grille de qualité pour interpréter les concentrations métalliques (en µg/g) observées chez *Dreissena polymorpha* (MERSCH, 1993).

Métaux	Classe de qualité*			
	1	2	3	4
Cadmium	≤ 1	1 - 2.5	2.5 - 8	> 8
Chrome	≤ 1	1 - 3.5	3.5 - 10	> 10
Cuivre	≤ 12	12 – 45	45 - 80	> 80
Nickel	≤ 12	12 – 45	45 - 100	> 100
Plomb	≤ 0,5	0.5 – 4	4 - 14	> 14
Zinc	≤ 110	110 - 120	220 - 400	> 400

- *
 Classe 1 : absence de pollution ;
 Classe 2 : situation intermédiaire ;
 Classe 3 : pollution certaine ;
 Classe 4 : pollution importante.