



HAL
open science

Contribution à l'étude analytique des polluants (en particulier de type métaux lourds) dans les eaux du fleuve Chari lors de sa traversée de la ville de N'Djamena
Nambatingar Ngaram

► **To cite this version:**

Nambatingar Ngaram. Contribution à l'étude analytique des polluants (en particulier de type métaux lourds) dans les eaux du fleuve Chari lors de sa traversée de la ville de N'Djamena. Chimie analytique. Université Claude Bernard - Lyon I; Université de N'Djaména, 2011. Français. NNT : 2011LYO10358 . tel-01163894

HAL Id: tel-01163894

<https://theses.hal.science/tel-01163894>

Submitted on 15 Jun 2015

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.

Université Claude Bernard



Lyon 1



UNIVERSITÉ DE LYON



N° d'ordre : **294-2011**

Année 2011

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON

délivrée par

L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON1

et préparée en cotutelle avec

l'Université de N'Djamena

ECOLE DOCTORALE de CHIMIE de LYON

DIPLOME DE DOCTORAT

(arrêté du 7 août 2006 / arrêté du 6 janvier 2005)

Soutenue publiquement le 20 décembre 2011

Par

M NGARAM Nambatingar

TITRE :

Contribution à l'étude analytique des polluants (en particulier de type métaux lourds) dans les eaux du fleuve Chari lors de sa traversée de la ville de N'Djamena.

Directeur de thèse : **Pr. LANTERI Pierre**

Jury

M. Jean-Marc CHOVELON, Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon1

M. Pierre LANTERI, Professeur des Université, Université Claude Bernard Lyon1

M. Alain MERLE, Professeur, Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers

M. Serge RUDAZ, Professeur, Université de Genève-Suisse

M. Mianpereum TARKODJIEL, Vice-Recteur Chargé de Recherche, Université de Moundou-Tchad

M. New Mahamat TCHADANAYE, Maitre assistant, Université de N'Djamena

A la mémoire de mon père

Mon épouse TALLO Habiba

Mes filles Lovanie et Graciela NAMBATINGAR

Préambule

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une convention en co-tutelle entre l'Université Claude Bernard Lyon I et l'Université de N'Djamena. Ce manuscrit concrétise trois années et demie passées au sein du Laboratoire des Sciences Analytiques UMR 5180.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé à ce travail et m'ont soutenu pour la réalisation de ce manuscrit.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à mon directeur de thèse Pierre LANTERI et Alain MERLE grâce auxquels cette thèse a pu se dérouler dans de parfaites conditions. Je remercie sincèrement Pierre LANTERI de m'avoir accueilli dans son laboratoire, d'avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail et de la confiance qu'il a témoignée à mon égard. Je remercie Alain MERLE pour sa patience, ses conseils avisés, sa disponibilité et l'art avec lequel il trouve une solution aux problèmes qu'ils soient d'ordre scientifique, logistique ou administratif.

Je remercie Madame Nadia BASKALI pour l'intérêt qu'elle a porté sur ce travail en acceptant de suivre et coordonner toutes les manipulations dans les différents laboratoires. Cette étude est le résultat de sa disponibilité et de ses pertinentes et fructueuses remarques. Qu'elle trouve ma profonde gratitude.

Je remercie Monsieur TCHADANAYE New Mahamat Responsable du Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement de l'Université de N'Djamena pour avoir accepté de suivre ce travail depuis le Tchad. Je voudrai lui exprimer mes meilleurs remerciements pour avoir facilité les relations entre le Laboratoire des Sciences Analytiques UMR 5180 et l'Université de N'Djamena.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble des membres de jury : Monsieur RUDAZ Serge et Monsieur TARKODJIEL Mianpereum, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir y participer en tant que rapporteurs, ainsi que Monsieur CHOVELON Jean-Marc qui a accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Je remercie vivement Monsieur Jean Yves GAUVRIT pour l'aide scientifique qu'il a bien voulu apporté à ce travail et pour sa collaboration fructueuse à la réalisation de ce travail.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Yohann CLEMENT de ses conseils lors du traitement des données. Les analyses de l'étude n'auraient pas pu être effectuées sans son aide précieuse.

Je remercie Monsieur Hervé DELEPINE, Chargé de relation formation-entreprises à l'Université Claude Bernard Lyon1 pour ses conseils et son aide efficace, en particulier, dans l'analyse par absorption atomique à froid.

Je remercie Madame Marie Hélène LARA de sa disponibilité et de ses conseils qui m'ont accompagné tout au long de cette thèse.

J'adresse mes remerciements à tout le personnel et enseignants de l'IUTA-Lyon1 pour m'avoir permis d'entreprendre ce travail. Je veux exprimer ma reconnaissance à Monsieur Christophe VITON, Chef de Département de chimie à l'IUTA-Lyon1 pour sa confiance et son soutien.

Je remercie Monsieur Brahim BOY OTCHOM pour les conseils qu'il m'a apportés au cours de cette thèse et pour les corrections se rapportant au manuscrit

Ma pensée va à Monsieur NADJITONON Ngarmaïm pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée dans les travaux d'impression et d'illustration de cette thèse. Cette pensée va également à Monsieur DAKINODJI Jaques, à Monsieur DEDJIBO Djitan et à Monsieur MADJIADOUM Abanga pour leur aide technique.

Cette étude a été réalisée grâce à la bourse du Gouvernement Français. Je tiens à remercier très sincèrement les Responsables de l'Ambassade de France au Tchad pour cette opportunité.

J'adresse mes remerciements au rectorat de l'Université de N'Djamena pour m'avoir permis d'entreprendre ce travail. J'exprime ma reconnaissance à Monsieur le Recteur de l'Université de N'Djamena pour son soutien.

Ma reconnaissance s'adresse également à tous les collègues enseignants de la Faculté des Sciences Exactes et Appliquées de l'Université de N'Djamena. Je veux exprimer ma reconnaissance à Monsieur KELEYPETTE Dono, Chef de Département de chimie pour sa confiance et son soutien.

Je tiens à remercier Monsieur TEDEBAYE Rogoum, Madame Odile TAMDI et Monsieur MINGUENGAR pour l'aide apportée aux analyses physicochimiques réalisées au Laboratoire de L'Eau et de l'Environnement de l'Université de N'Djamena.

Merci à toi...que j'ai pu oublier

Sommaire

Titres	Pages
<i>Préambule</i> _____	2
<i>INDEX DES FIGURES ET TABLEAUX</i> _____	8
<i>INTRODUCTION GENERALE</i> _____	14
Introduction _____	15
Contexte _____	18
Problématique _____	18
Cadre législatif et réglementaire _____	21
Méthodologie de recherche _____	21
Cadre d'étude _____	22
<i>CHAPITRE 1</i> _____	24
<i>REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</i> _____	24
I.1- La composition chimique de l'eau _____	25
I.2- La qualité de l'eau de surface _____	26
I.3- Etat de la pollution de l'eau dans le monde _____	27
I.3.1- Les ressources _____	27
I.3.2- La pollution des fleuves _____	27
I.3.3- Eau et assainissement _____	29
I.4- Etat de la pollution de l'eau en Afrique _____	29
I.4.1- Détérioration de la qualité de l'eau _____	30
I.5- Etat de la pollution de l'eau au Tchad _____	31
I.5.1- Géographie, contexte démographique _____	31
I.5.2- Hydrographie du Tchad _____	32
I.5.3- Climat, pluviométrie et végétation _____	35
I.5.4- Eau, hygiène du milieu et assainissement _____	41
I.5.5- Le couvert végétal _____	42
I.5.6- Les écosystèmes aquatiques _____	43
I.6- Industries : procédés de fabrication et typologie de rejets liquides _____	44
produits _____	44
I.6.1- Typologie des effluents liquides industriels _____	45
I.6.2- Industrie de transformation de la canne à sucre : CST _____	46
I.6.3- Egrenage et textile : Cotontchad et Cotex _____	47
I.6.3.1- Egrenage _____	47
I.6.3.2- Le textile _____	47
I.6.4- Huilerie _____	48
I.6.5- Savonnerie _____	48
I.6.6- Les brasseries _____	49

I.6.7- Les abattoirs	50
I.6.8- Les centrales électriques : la STEE	50
I.6.9- Constructions mécaniques, ateliers	51
I.6.10- Les imprimeries	52
I.6.11- Le pétrole	52
I.7- Caractérisation physicochimiques des effluents industriels	52
I.7.1- Généralité	52
I.7.2- L'oxygène dissous	53
I.7.2.1- La photosynthèse et la respiration	53
I.7.2.2- Solubilité de l'oxygène	54
I.7.2.3- Vie dulcicole	56
I.7.3- Demande chimique en oxygène (DCO)	56
I.7.4- Demande biochimique en oxygène (DBO)	57
I.7.5- Le pH	58
I.7.6- La conductivité	58
I.7.7- La turbidité	59
I.7.8- La température	59
I.7.9- Les métaux lourds	59
I.7.9.1- Source naturelle	59
I.7.9.2- Sources anthropiques	60
I.8- Répartition et devenir des métaux lourds dans l'environnement aquatique	61
I.9- L'adsorption des métaux par des sédiments	63
I.10- Paramètres influant sur la mobilité des métaux dans l'eau	64
I.11- Précipitation d'hydroxyde	65
I.12- Effets des métaux	67
I.13- L'eutrophisation	79
CHAPITRE 2	81
MATERIEL ET METHODES	81
II.1- Localisation des points de prélèvement	82
II.2- Période d'étude	83
II.3- Matériel	83
II.4- Méthodologie d'analyse	84
II.4.1- La spectrométrie d'absorption atomique	84
II.4.2- Absorption atomique à vapeur froide	85
II.4.3- Spectrométrie d'émission dans un plasma induit (ICP)	86
II.4.4- La chromatographie ionique en phase liquide	86
II.4.5- Spectrophotomètre modèle DR2400	87
II.4.6- Mesure manométrique de la DBO (Demande biochimique en oxygène)	90
II.4.7- Mesure de la DCO (Demande chimique en oxygène)	90
II.4.8- L'analyse statistique ACP (Analyse en composantes principales)	91
II.5 Opération de terrain et prélèvement	95

II.6 Evolution des Systèmes d'évaluation de la qualité des cours d'eau SEQ-Eau _____	95
II.7 Les différents usages de l'eau _____	99
CHAPITRE 3 _____	100
RESULTATS ET DISCUSSIONS _____	100
III.1- Caractérisation des eaux du fleuve Chari _____	101
III.2- Paramètres physicochimiques _____	102
III.2.1- Variation spatiale des paramètres _____	102
III.2.2- Variation saisonnière des paramètres _____	118
III.2.3- Analyse des données _____	125
III.2.4- La potentialité chimique et classes d'aptitude aux usages des eaux du Chari _____	138
III.2.4.1- Matières organiques et oxydables _____	138
III.2.4.2 pH, turbidité et matières en suspension _____	139
III.2.4.3 – Nitrate, Phosphate et micropolluants minéraux _____	139
III.2.3.4 – Conclusion _____	140
CHAPITRE 4 _____	143
CONCLUSION – RECOMMANDATIONS - PESPCTIVES _____	143
IV.1- Conclusion _____	144
IV.2- Recommandations _____	145
IV.2.1- Sur le plan technique _____	145
IV.2.2- Sur le plan réglementaire _____	146
IV.2.3- Sur le plan de la recherche _____	146
IV.3- Perspectives _____	147
V- REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE _____	148
ANNEXES _____	159

INDEX DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURES

<i>Figure 1.1 Carte de l'hydrographie dans le bassin versant du Chari et du Logone.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 1.2 Rétrécissement du Lac Tchad. Source NASA 2001, images Landsat.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 1.3 Variation des normales pluviométriques suivant les latitudes du Sud au Nord.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 1.4 Précipitations annuelles à N'Djamena (1971 à 2009).....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 1.5. Carte des isohyètes annuelles de la République du Tchad.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 1.6 Courbes de crues de références du Chari.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 1.7 Schéma des principaux flux de masse d'air en Afrique de l'ouest et coupe nord sud de la troposphère avec la localisation des zones pluvieuses au sol.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 1.8 Température moyennes mensuelles à N'Djamena (24 ans).....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 1.9 Phénomène de complexation des métaux dans l'eau (INERIS, mars 2004).....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 1.10 Représentation schématique d'un système d'échange eau-sédiment (B.Serpaud et al., 1994).....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 2.1 Localisation des points de prélèvement.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 3.1 Température moyenne des eaux du Chari.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 3.2 Valeurs moyennes de pH des eaux du Chari.....</i>	<i>103</i>
<i>Figure 3.3 Conductivités moyennes des eaux du Chari.....</i>	<i>104</i>
<i>Figure 3.4 Moyenne de Turbidité des eaux du Chari.....</i>	<i>104</i>
<i>Figure 3.5 Teneur moyenne en oxygène dissous.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 3.6 Teneur moyenne en DBO5.....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 3.7 Teneurs en DCO en DCO.....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 3.8 Teneur moyenne en nitrate.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 3.9 Teneur moyenne en phosphate.....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 3.10 Teneur moyenne en sulfate.....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 3.11 Teneur moyenne en fluorure.....</i>	<i>110</i>
<i>Figure 3.12 Teneur moyenne en chlorure.....</i>	<i>111</i>

<i>Figure 3.13 Teneur moyenne en zinc</i>	112
<i>Figure 3.14 Teneur moyenne en cuivre</i>	112
<i>Figure 3.15 Teneur moyenne en chrome</i>	113
<i>Figure 3.16 Teneur moyenne en manganèse</i>	114
<i>Figure 3.17 Teneur moyenne en nickel</i>	115
<i>Figure 3.18 Teneur moyenne en fer</i>	115
<i>Figure 3.19 Teneur moyenne en plomb</i>	116
<i>Figure 3.20 Teneur moyenne en cadmium</i>	117
<i>Figure 3.21 Variation en fonction de la saison de prélèvement des paramètres</i>	120
<i>Figure 3.22 Valeurs propres</i>	123
<i>Figure 3.23 Représentation des variables</i>	124
<i>Figure 3.24 Représentation des individus</i>	125
<i>Figure 3.25 Représentation des individus</i>	126
<i>Figure 3.26 Matrice des valeurs propres</i>	127
<i>Figure 3.27 Représentation des variables</i>	128
<i>Figure 3.28 Représentation des individus</i>	129
<i>Figure 3.29 Matrice des valeurs propres</i>	130
<i>Figure 3.30 Matrice des variables</i>	131
<i>Figure 3.31 Matrice des individus</i>	131
<i>Figure 3.32 Matrice des valeurs propres</i>	132
<i>Figure 3.33 Matrice des variables</i>	133
<i>Figure 3.34 Matrice des individus</i>	134

TABLEAUX

<i>Tableau I.1 Classement des eaux de surface stagnantes et courantes</i>	52
<i>Tableau I.2 Solubilité de l'oxygène dans l'eau en fonction de la température</i>	53
<i>Tableau I.3 Recommandations pour la qualité oxygène</i>	54
<i>Tableau I.4 Classification des métaux lourds selon leur densité et toxicité</i>	59
<i>Tableau I.5 Quelques exemples de sources d'où proviennent les métaux</i>	60
<i>Tableau II.1 Localisation géographique des stations</i>	82
<i>Tableau II.2 Grille d'évaluation SEQ-Eau</i>	95
<i>Tableau III.1 Valeur moyenne des paramètres mesurés par photométrie DR 2400</i>	100
<i>Tableau III.2 Valeurs moyennes des anions mesurés par chromatographie ionique (CI)</i>	100
<i>Tableau III.3 Position des paramètres dans les grilles multi usages</i>	101
<i>Tableau III.4 Valeur de l'oxygène dissous mesurées suivant les profondeurs</i>	105
<i>Tableau III.5 Moyennes en DBO5 et en DCO</i>	106
<i>Tableau III.6 Moyenne des résultats obtenus par saison</i>	117
<i>Tableau III.7 Matrice de corrélations sur l'ensemble des prélèvements</i>	123
<i>Tableau III. 8 Matrice des facteurs sur l'ensemble des valeurs</i>	124
<i>Tableau III. 9 Matrice de corrélations selon les débits</i>	127
<i>Tableau III. 10 Matrice des facteurs</i>	128
<i>Tableau III. 11 Matrice de corrélations</i>	129
<i>Tableau III. 12 Matrice des facteurs</i>	130
<i>Tableau III. 13 Matrice de corrélations</i>	132
<i>Tableau III. 14 Matrice des facteurs</i>	133
<i>Tableau III.15 Flux en kg/h de la demande en oxygène</i>	135
<i>Tableau III.16 Classes de qualité des métaux, nitrates et phosphates</i>	136

PHOTOS

<i>Photo1.1 L'écosystème du Logone eutrophié.....</i>	<i>43</i>
<i>Photo 1.2 Eaux résiduaires de la CST déversées sans traitement dans le Chari à Sarh.....</i>	<i>45</i>
<i>Photo1.3 Les eaux résiduaires des Brasseries déversées dans le Chari à N'Djamena.....</i>	<i>48</i>
<i>Photo 1.4 Exutoire des abattoirs frigorifiques de N'Djamena.....</i>	<i>49</i>
<i>Photo 1.5 Utilisation abusive de lessive, conséquence de l'eutrophisation.....</i>	<i>79</i>

LISTE DES ABREVIATIONS

AEP : Approvisionnement en Eau Potable

AFNOR : Association française de Normalisation

CBLT : Commission du Bassin du Lac Tchad

CEE : Communauté Economique Européenne

CMA : Concentration Maximale Admise

CMAP : Concentration Maximale Admise Provisoire

CST : Compagnie Sucrière du Tchad

DEAS : Département des Affaires Economiques et Sociales du Secrétariat des Nations Unies

DREM : Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie

ETM : Eléments Traces Métalliques

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

FIT : Front Inter-Tropical

HCNE : Haut Comité National de l'Environnement

INSEED : Institut National de des Sciences Statistiques et de la Démographie

ISO : Organisme de Standardisation Internationale

LABEEN : Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement

MEE : Ministère de l'Environnement et de l'Eau

MES : Matière En Suspension

NF : Norme Française

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONU : Organisation des Nations Unies

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

RCA : République Centrafricaine

RFI : Radio France Internationale

SEQ : Système d'Evaluation de la Qualité

SONASUT : Société Nationale Sucrière du Tchad

STEE : Société Tchadienne d'Eau et d'Electricité

STT : Société Textile du Tchad

TOD : Teneur en oxygène Dissous

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

L'eau est un liquide qui nous est familier et dont les propriétés sont remarquables. L'eau est utilisée pour l'alimentation, pour la toilette, pour l'industrie comme solvant, fluide caloporteur... Les fleuves sont des voies de communications pour les transports de personnes et de marchandises. Les eaux usées véhiculent les déchets domestiques et industriels.

Solvant polaire, l'eau est capable de dissoudre de très nombreuses substances. L'eau est un régulateur de chaleur important pour l'atmosphère (hygrométrie), parce qu'elle absorbe les rayonnements provenant du soleil et de la terre [1]. L'eau est essentielle à tous les êtres vivants et au maintien des propriétés environnementales de la terre [2].

De par sa situation géographique, le Tchad jouit d'une abondance relative de rivières et de cours d'eau qui lui procurent de nombreux avantages. Ces rivières et cours d'eau, qui alimentent en eau les exploitations agricoles et industrielles, les habitations (commerces, logements ...) établissements et domiciles, assurent également le maintien de la nappe phréatique et la pérennité de milieux fauniques hétérogènes. Cependant, le Tchad reste parmi les pays au monde où les fleuves et les cours d'eau, pourtant très poissonneux, subissent des aléas climatiques et servent de dépotoirs aux industries.

Le Chari, un des plus importants cours d'eau d'Afrique centrale, reçoit de multiples rejets urbains et industriels depuis la frontière du Tchad avec la République Centrafricaine jusqu'au Lac Tchad. Tout au long de ce parcours il y a un phénomène de dégradation de la qualité des eaux qui est du au fait que de nombreuses substances issues des rejets industriels et ménagers ne sont pas biodégradables et/ou ne le sont que dans des conditions très particulières. Ces substances dites polluantes ont un devenir et un impact assez lourd sur les différents écosystèmes et sont très dépendants de leurs interactions avec le milieu environnant. Ils s'accumulent dans l'eau et par suite dans les êtres vivants qui les ingèrent dans leur organisme. Ce problème de pollution est aggravé par des variations très importantes des régimes hydrauliques avec l'ensablement du fleuve et les sécheresses (1972-1973 et 1984-1985) qui ont sévi sur l'Afrique tropical au sud du Sahara. La situation est d'autant plus inquiétante si l'on tient compte du fait que les populations riveraines consomment les eaux du Chari dans leur alimentation ...

De nombreux tchadiens commencent à s'inquiéter de la rareté de certaines espèces de poissons dont le cycle de reproduction serait lié à la pollution. Depuis quelques années, les données des paramètres organoleptiques et physicochimiques recueillies par le Laboratoire de

l'Eau et de l'Environnement (LABEEN) de l'Université de N'Djamena ont permis de comprendre que la qualité de l'eau du Chari et du Logone est directement menacée par les pollutions de toute catégorie : pollutions fécales (responsable de typhoïde, choléra), domestiques, industrielles, etc. Les effluents industriels présentent des couleurs et des odeurs très variables, plus ou moins intenses en fonction de la nature de leur pollution. Les pollutions peuvent altérer la qualité des eaux superficielles et souterraines. Les polluants peuvent être toxiques pour la faune et la flore et peuvent être à l'origine des maladies. De nombreux témoignages suivis sur les ondes de la Radio France Internationale (RFI) ont mis en évidence depuis quelques années les effets de la présence des produits chimiques dans les milieux aquatiques tchadiens ; on a montré par exemple que les riverains du Chari, du Logone et du Lac Tchad souffrent de diarrhée, d'affections articulaires, de problèmes rénaux, circulatoires et nerveux, de syndromes de fatigues chroniques et de maladies cancéreuses. Les principaux micropolluants impliqués dans les phénomènes de pollutions chimiques et retrouvés dans les eaux de Chari sont les métaux (Plomb, Cadmium, Manganèse, Zinc, Cuivre, Chrome, Nickel...) et les molécules organiques (Pesticides, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, Polychlorobiphényles...). Ces dernières sont exclusivement introduites dans les milieux aquatiques par l'activité anthropique (amélioration de la production des cultures, industries), contrairement aux métaux qui eux sont présents naturellement dans la plupart des roches.

La présente étude porte sur l'analyse physicochimique des eaux du fleuve Chari aux alentours de N'Djamena dans la région du Chari Baguirmi, au sud est du Lac Tchad. La région du Chari Baguirmi est une zone où les ressources hydriques sont fortement sollicitées pour diverses activités : agriculture, élevage, pêche et industrie.

La connaissance et la compréhension du fonctionnement du milieu aquatique est nécessaire pour le contrôle, la protection, l'aménagement et la gestion des ressources en eau. Bien que de nombreuses rivières fassent annuellement l'objet de mesures analytiques par le laboratoire LABEEN, à ce jour aucune étude n'a été faite au Tchad sur l'impact des polluants.

A l'issue de ces recherches, des éléments seront fournis pour essayer de donner un indice de pollution caractéristique ainsi que des recommandations précisant les limites tolérables de quelques polluants pour diminuer les risques sanitaires [3]. Les résultats des études de caractérisation des effluents industriels pourraient aider les industriels et les autorités à

prendre conscience de la nécessité de traiter les eaux usées et donc d'ouvrir des stations de retraitement. Les principaux objectifs sont:

- l'identification à l'aide des techniques appropriées des polluants de type métaux lourds retrouvés dans des eaux destinées à la consommation humaine ;
- l'identification des facteurs susceptibles de modifier la composition des eaux du Chari;
- la constitution d'une première base de données de connaissance des polluants en fonction des origines des rejets.

Cette étude est basée sur trois axes principaux:

1. Les enquêtes préliminaires dans les établissements industriels de N'Djamena et d'autres villes du Sud afin de réunir les informations sur les substances susceptibles d'être rejetées par ces établissements ;
2. Les analyses physicochimiques *in situ* des eaux du fleuve Chari prélevées en différents points : en amont et en aval de la ville de N'Djamena ainsi qu'aux exutoires des industries ;
3. Le dosage des métaux et des ions divers qui constitue la partie fondamentale de l'étude à l'échelle du laboratoire réalisée à N'Djamena et à Lyon.

Cette thèse comporte quatre chapitres.

- Le chapitre 1 est consacré à une analyse bibliographique, de l'environnement et de la qualité physicochimique des eaux. Les caractéristiques géographiques, climatiques et hydrologiques sont abordées.

- Le chapitre 2 présente le matériel de recherche utilisé, la méthodologie de prélèvement, de conservation et d'analyse des échantillons. Dans cette partie sont exposés les protocoles expérimentaux et leur discussion.

- Le chapitre 3 donne les résultats des analyses. La validité de ces résultats et leur interprétation sont étroitement subordonnées au respect rigoureux du protocole de prélèvement et d'analyse que nous avons conçu. La variabilité spatio-temporelle de la qualité physicochimique des stations (points de prélèvement) est analysée. La qualité des eaux est évaluée à partir d'une grille d'évaluation de l'Agence de l'Eau qui associe, pour une série de

paramètres physicochimiques, des valeurs seuils à 5 classes de qualité représentées par des couleurs. Cette grille permet une évaluation sommaire de l'aptitude aux principaux usages et fonctions.

- Le chapitre 4 enfin présente des recommandations et les perspectives à travers la mise en place d'une « norme » indiquant précisément les limites tolérables des différents polluants identifiés pour éviter tout risque sanitaire.

Contexte

La consommation globale d'eau par an et par habitant peut atteindre mille cinq cent mètres cubes aux Etats-Unis [4] alors qu'elle n'est que de cent mètres cube dans les pays en voie de développement !

La plupart des établissements industriels que nous avons visités au Tchad produisent des déchets, parfois toxiques, qui peuvent être à l'origine de risques écologiques. Les industries peuvent agir très négativement sur les écosystèmes aquatiques: elles ont une demande en eau potable croissante pour accroître leur productivité ; elles peuvent produire également des effluents liquides, pollués par des microorganismes pathogènes, par des radioéléments ou par des substances chimiques dont certaines ont un caractère peu biodégradable [5]. Dans les pays industrialisés, d'importants programmes de traitement des eaux ont permis de diminuer la contamination des eaux. Beaucoup de pays africains ont emboîté le pas du point de vue législatif en faisant adopter des lois et des normes dans le domaine de l'eau. Ces lois partent du principe que l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation. Elles affirment qu'une gestion équilibrée de la ressource en eau est nécessaire pour assurer la préservation des écosystèmes aquatiques, la protection contre la pollution et la restauration de la qualité des eaux.

La pollution des eaux des fleuves Chari et Logone a cru considérablement depuis l'installation de Sociétés agroalimentaires, d'établissements industriels et d'exploitants de produits pétroliers, comme en témoignent les résultats des observations et des analyses réalisées par l'Institut des Nations Unis pour la Formation et la Recherche [6]. Le Chari est ainsi le siège d'entrées anthropiques responsables de l'augmentation des niveaux de contamination.

Problématique

- **Sources de pollution et impacts**

Les pouvoirs publics ont déployé des efforts importants dans le secteur d'approvisionnement en eau potable (AEP) ces dernières années au Tchad. Malheureusement ce secteur n'est pas accompagné d'un programme d'assainissement dans le cadre du développement urbain et industriel. Le Tchad étant inscrit sur la liste des pays producteurs de pétrole, beaucoup d'investisseurs sont intéressés par certains secteurs de développement jusque là non explorés. Cependant, il manque de programmes de contrôle de qualité des rejets des effluents industriels. Il n'y a pas, à notre connaissance, d'études publiées donnant des concentrations naturelles en métaux des eaux du Chari. La pollution des eaux, aux origines multiples passe, en général inaperçue à moins que le dysfonctionnement du système fluvial ne finisse par avoir un fort impact visuel...

Pendant des dizaines d'années, les fleuves ont « hérité » des rejets industriels et des eaux résiduaires associées. Les rejets de ces industries en terme de volume d'eaux usées et de composition chimique sont peu ou mal connus. Les sources de pollution ne sont pas seulement d'origine industrielle. Nous pouvons également évoquer :

- les eaux de ruissellement, les eaux domestiques et même les eaux pluviales ;
- la circulation routière responsable des gaz toxiques ;
- L'épandage accru de pesticides, de produits phytosanitaires et de fertilisants en milieu agricole, principalement dans les zones méridionales où se pratique une immense culture de coton.

Le mauvais circuit d'eau potable pour l'approvisionnement en eau et l'absence de moyens d'hygiène expliquent les taux élevés des maladies liées à l'eau. Le Tchad est l'un des pays au monde où les principales causes de mortalité sont liées aux maladies d'origine hydrique et aux conditions d'hygiène. La couverture sanitaire reste insuffisante et sa répartition est inégale malgré les efforts consentis ces dernières années par le Gouvernement [7].

- **Normes de qualités relatives aux paramètres physiques et chimiques**

Les normes relatives aux milieux fluviaux ont été notamment conçues afin de préserver la vie aquatique et humaine. Elles visent à fournir aux consommateurs une eau qui ne puisse pas constituer un risque pour la santé. Les normes et les modalités d'application sont différentes d'un pays à un autre, voire d'une province à une autre. En l'espace de cent ans, les normes françaises, par exemple, ont profondément évolué. Ainsi, en 1885 la potabilité d'une eau était

définie à l'aide de six paramètres seulement. Il en fallait soixante-deux en 1980 (Directives CEE du 15 juillet 1980) [8]. Il s'agissait au départ, de paramètres simples de type saveur et limpidité. Aujourd'hui, la liste et les concentrations maximales admissibles (CMA) qui sont associées à la potabilité de l'eau ont été fixées en fonction de différentes nuisances. Ces normes ne sont pas définitives, étant donné que le déversement des eaux usées industrielles augmente la quantité et la diversité des produits toxiques présents dans une eau. La réglementation française [9] relative aux limites de qualité des eaux douces superficielles utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine propose, en plus des paramètres physiques, chimiques et biologiques, des objectifs esthétiques. Certaines de ces qualités visuelles sont vérifiées systématiquement (coloration, transparence, huiles minérales, substances tensioactives, les résidus goudronneux et matières flottantes); les autres paramètres peuvent être les suivants : pH, oxygène dissous, pesticides, métaux lourds ou la tendance à l'eutrophisation (ammoniac, azote de Kjeldahl, nitrates et phosphates). Les normes de qualité sont des concentrations « seuil » qui ne doivent pas être dépassées dans le milieu pour assurer la protection des écosystèmes et de la santé humaine. Dans le règlement sur les eaux destinées à la consommation humaine [10], seules les substances présentant un risque direct pour la santé sont contrôlées. Ainsi, on a pu définir les concentrations maximales acceptables (CMA) pour les substances qui peuvent nuire à la santé. Les CMA sont des valeurs limites au-delà desquelles il serait possible d'observer un effet sur la santé. Pour certaines substances, l'insuffisance de données toxicologiques ne permet pas d'établir une CMA avec une certitude raisonnable. On propose alors une concentration provisoire (CMAP) en fonction des données connues, celles concernant la santé.

Il est possible d'exiger de chaque industrie un rapport périodique sur les caractéristiques de ses rejets. C'est donc un effort qui doit mobiliser aussi bien des financements publics pour l'élaboration des normes que les fonds propres industriels pour la mise en place des équipements de traitement appropriés.

Beaucoup de produits « chimiques » importés au Tchad sont détournés de leur utilisation initiale pour servir à la pêche et à la chasse par « empoisonnement » des cours d'eau afin de récupérer les poissons ! Beaucoup de cas d'intoxications observés dans les milieux ruraux sont dus à la mauvaise utilisation de produits chimiques (les pesticides en agriculture) et à l'ignorance du danger de ces produits [6].

N'Djamena étant située en amont d'autres villes (Moundou et Sarh), reçoit de celles-ci par le biais du Chari et du Logone tous les rejets industriels préjudiciables...

Cadre législatif et réglementaire

L'activité humaine est responsable de l'introduction de divers polluants dans l'environnement et particulièrement dans le milieu aquatique. Certains polluants peuvent être biodégradables et disparaître avec le temps, alors que d'autres ne le sont pas et peuvent persister, s'accumuler et devenir toxique. C'est dans ce cas que divers textes réglementaires au niveau mondial ont fixé des objectifs pour limiter, diminuer et même supprimer les polluants considérés comme toxiques. Il existe au Tchad des réglementations et des textes en ce qui concerne les rejets liquides dans le milieu naturel. Malheureusement, ces textes relatifs à la protection de l'environnement et à la santé ne s'appliquent pas (Annexe 2).

Méthodologie de recherche

Nous nous sommes particulièrement intéressés aux métaux et notamment ceux qui sont indésirables et nuisibles : cadmium (Cd), chrome (Cr), cuivre (Cu), mercure (Hg), plomb (Pb), zinc (Zn), nickel (Ni), fer (Fe) et le manganèse (Mn). L'étude porte sur la détermination et l'analyse des métaux dans le milieu aquatique, en tenant compte des variations temporelles (saisonniers) pour permettre une interprétation pertinente des résultats analytiques. La difficulté de ces mesures est d'autant plus grande que ces composés chimiques ne se conservent pas. Par suite de variations de température, de pression mais aussi au contact de l'air,... les concentrations de ces composés peuvent varier de façon extrêmement significatives et certains composés peuvent disparaître complètement entre le moment de prélèvement et celui de la mesure (l'élément peut se volatiliser ou précipiter) [11].

Pour répondre aux différentes questions liées à la pollution physicochimique des eaux et atteindre les objectifs de ce travail, nous avons procédé à :

- une recherche bibliographique tant au niveau mondial, africain que tchadien ;
- des visites préliminaires des différents Etablissements industriels sources potentielles de pollution ;
- des entretiens avec les personnels des industries, les riverains et les pêcheurs pour connaître leur opinion relative au problème ;

- la détermination de la teneur totale des métaux lourds et de quelques anions car la mesure des concentrations individuelle des différentes formes des métaux dans l'eau est plus délicate à réaliser.

Cadre d'étude

La ville de N'Djamena (1 000 000 habitants) est située sur la rive droite du fleuve Chari. Née le 22 avril 1900, érigée en commune en 1919, N'Djamena ex Fort Lamy est installée à la frontière du Cameroun, au confluent du Logone et du Chari sur la rive est au sud du lac Tchad. N'Djamena est situé à 12°8 de latitude nord et à 15°2 de longitude est. C'est un centre administratif, universitaire, industriel et commercial. N'Djamena connaît un climat désertique avec des températures élevées le jour et fraîches la nuit. La moyenne annuelle de la température est de 28°C. La saison des pluies s'étale entre mai et septembre. La pluviométrie moyenne est de 500 à 700 mm. Le Chari, très hétérogène, avec un débit moyen de 537 m³/s est déficient et instable en raison des taux d'évaporation particulièrement élevés.

La ville de N'Djamena se trouve dans le Chari Baguirmi. Le Chari Baguirmi s'étend entre le 10^e et le 14^e parallèle nord et entre le 14^e et le 18^e méridien est. Le Chari Baguirmi couvre une partie du Lac Tchad qui draine à lui seul, une superficie endoréique d'environ deux millions de km². La région du Chari Baguirmi est une succession de terrains argilo-sableux compacts et très plats. La profondeur moyenne de la «nappe phréatique de N'Djamena» est de 35 à 40 m avec cependant des variations locales; Les eaux de cette nappe sont en général peu minéralisées. La nappe du Chari Baguirmi est alimentée par les fleuves Chari et Logone. Pendant la saison des pluies, les précipitations et les débordements de ces deux fleuves en crue s'accumulent dans des marigots et dans des plaines d'inondations, donnant naissance à des cours d'eau temporaires. Ainsi les précipitations qui s'ajoutent aux débordements du Chari et du Logone peuvent aussi contribuer à l'alimentation de la nappe.

Dans le but d'évaluer la qualité physicochimique du fleuve Chari aux alentours de N'Djamena, nous avons entrepris plusieurs campagnes de prélèvements des eaux sur les sites dont le choix a été fixé grâce à la connaissance des lieux de déversement des eaux résiduelles des industries. Ainsi, six sites de prélèvement, allant du Sud-Est au Sud-Ouest de N'Djamena et s'étendant sur environ 30 Km, ont été choisis.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- La composition chimique de l'eau

L'eau possède, grâce à ses propriétés physicochimiques, d'excellentes qualités de solvant et à ce titre, représente un important moyen de transport d'espèces dissoutes, de microparticules ou de microorganismes [12].

La composition d'une eau issue du milieu naturel est très variable selon la couche géologique d'où elle provient et les substances chimiques réactives qu'elle est susceptible de rencontrer. Ainsi, lors de sa circulation dans le sol ou à la surface de la terre, l'eau se pollue et se charge de matières en solution (substances dissoutes minérales ou organiques) ou en suspension : particules d'argile, déchets de végétation, organismes vivants, sels divers, matières organiques. Ces particules sont caractérisées par des surfaces d'échange variables tant en nature qu'en intensité.

L'eau contient aussi des gaz dissous : l'air, le gaz carbonique, et parfois quelques hydrocarbures légers comme le méthane.

Selon le parcours et le milieu traversé, les eaux contiennent beaucoup de matières minérales dissoutes sous formes ioniques ; on peut citer les ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), carbonates (CO_3^{2-}), bicarbonates (HCO_3^-), sulfates (SO_4^{2-}), chlorures (Cl^-) et nitrates (NO_3^-). Ils proviennent pour l'essentiel du lessivage des sols par les eaux de pluie et de ruissellement. La teneur en matières minérales dissoutes peut varier du milligramme par litre, pour les eaux classées douces, à plusieurs grammes par litre, pour les eaux les plus saumâtres des mers ou océans.

Ces matières minérales peuvent aussi résulter de l'activité humaine au travers de rejets non contrôlés dans l'environnement ; ce sont par exemple des ions nitrates susceptibles de provenir d'exploitations agricoles ou des ions des métaux lourds reliés à des activités industrielles. En situation de ruissellement l'eau contribue au mécanisme d'érosion de l'écorce terrestre, et de ce fait elle peut également contenir des matières minérales en suspension, par exemple des matériaux argileux ou limons. Ces matières se retrouvent essentiellement dans la classification des eaux de surface.

Les eaux peuvent aussi contenir des matières organiques ; ces matières sont alors présentes soit sous forme dissoute (les solvants, les pesticides...) soit en suspension (cas des déchets végétaux ou du plancton). Ces composés proviennent pour l'essentiel de la dégradation de la matière organique présente dans le milieu naturel ou dans les sols lessivés par les pluies suite

à la décomposition de la matière biologique constitutive des plantes et animaux, mais aussi de composés issus de l'activité humaine. Leur concentration, infime dans les eaux profondes, peut atteindre quelques dizaines de milligrammes par litre dans les eaux de surface.

I.2- La qualité de l'eau de surface

La qualité d'un fleuve ou d'une rivière est une notion difficile à appréhender. Qualité pour qui ? Pourquoi ? Les niveaux de qualité sont différents si l'eau est destinée à la production d'eau potable ou à un usage industriel. Il existe non pas une qualité mais des qualités de l'eau, selon leur usage et les normes qui lui correspondent. La qualité de l'eau dépend des facteurs naturels déterminants (sol, sous-sol etc.) et d'activités humaines produisant des rejets qui se retrouvent directement ou indirectement dans les milieux aquatiques. En effet, en absence de toute influence humaine, la qualité chimique naturelle d'une eau résulte d'une somme de processus géologiques, biologiques et hydrologiques universels. Ce qui conduit à la diversité de qualités physicochimiques et microbiologiques. Ainsi, parler de la qualité des eaux de surface suppose donc un minimum de connaissance des moyens d'évaluation et les conditions et modalités de leur mise en œuvre sur le fleuve. La principale cause de la dégradation de la qualité des cours d'eau par les activités humaines peuvent être regroupées en deux catégories: l'altération de la qualité de l'eau et la dégradation physique des milieux aquatiques [13].

L'altération de la qualité de l'eau: on en distingue trois types : l'altération chimique (qui résulte de la dissolution, de l'oxydation ou de l'hydrolyse), l'altération thermique (qui résulte du dégagement de chaleur) et l'altération biologique (de l'action de racines, de lichens et d'animaux) [14]. L'altération de la qualité de l'eau en général est liée aux types de rejets (ponctuel ou diffus). Cette altération peut provoquer la disparition des organismes sensibles aux pollutions et éventuellement rendre l'eau impropre à certains usages.

La dégradation physique des milieux aquatiques: elle correspond aux aménagements hydrauliques, aux actions de curage, de requalification des cours d'eau... La fonctionnalité du cours d'eau peut être atteinte par la perte des potentialités d'autoépuration naturelle, le dysfonctionnement de la régulation des échanges avec la nappe phréatique, les étiages, la fonction potentielle de rétention des crues, etc.

I.3- Etat de la pollution de l'eau dans le monde

I.3.1- Les ressources

L'eau est considérée partout comme l'élément le plus fondamental et indispensable de toutes les ressources naturelles. La gestion en ressource en eau est un défi de taille pour la plupart des pays au monde [15]. Le volume total de l'eau sur la terre est d'environ 1 400 millions de km³, dont 2,5% seulement, soit environ 35 millions de km³, est de l'eau douce. Les principales sources de l'eau utilisables par l'homme sont les lacs, les rivières, les fleuves, l'humidité du sol et les nappes aquifères relativement peu profondes. La fraction utilisable représente environ 200 000 km³, ce qui représente moins de 1% d'eau douce. Un tiers environ de la population mondiale vit dans des pays qui ont un déficit d'eau et où la consommation de cette dernière dépasse les ressources renouvelables. Selon la Commission du Développement Durable de l'ONU (CDD, 1997) quelques 80 pays, représentant 40% de la population mondiale souffraient au milieu des années 90 de diverses pénuries d'eau, et dans moins de 25 ans deux tiers de la population mondiale vivront dans les pays connaissant un déficit hydrique [16]. En outre en 2025, le monde comptera 2,6 milliards de personnes en plus. La population des villes aura augmenté de 160 % et sera devenue deux fois plus nombreuses que la population rurale [16]. Dans ces conditions, on peut prédire que la consommation individuelle d'eau douce va exploser dans les prochaines décennies. L'industrie puise une part importante des réserves mondiales d'eau douce et cela représente 20 à 25 % de la consommation totale. De plus, les demandes ne cessent de croître [16]. Si la tendance actuelle se poursuit, il est prévu qu'en 2025, les besoins en eau auront doublé. Aux Etats Unis, la production industrielle nécessitera bientôt plus de 1500 milliards de litres d'eau et rejettera plus de 300 milliards de litres d'eau par année [16]. La pollution à grande échelle des eaux de surface menace les réserves d'eau douce non polluée. Selon l'organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), la production agricole devra augmenter de 50 % pour nourrir tous les habitants de la planète [16]. De telles situations feront sans aucun doute « exploser » les besoins en eau douce.

I.3.2- La pollution des fleuves

La pollution des eaux est une notion relative: son évolution se mesure par rapport à un état initial naturel. Ce changement de qualité des eaux est occasionné par l'intervention humaine. Parmi les sources de pollution figurent les eaux usées non traitées d'origine industrielle,

agroalimentaire et domestique ainsi que le transport maritime et fluvial d'hydrocarbure. L'augmentation de l'urbanisation, l'agriculture et le développement du littoral en Afrique du Sud, par exemple, ont contribué à la diffusion et à l'apport direct de la pollution dans les estuaires [17]. Les barrages des grands fleuves mondiaux en sont aussi des exemples: Volga, Tigre, Indus, Nil, Niger, bientôt le Chari après le dragage ou le dessablement... D'autres activités humaines peuvent contribuer également à la pollution des eaux : le déboisement, le déversement des pesticides et des fertilisants, la construction des routes, et les incendies...L'irrigation, dans les pays arides, conduit également à une augmentation très forte de l'évaporation des eaux de surface et à leur salinisation. Citons le cas du bassin du Colorado qui comporte des terrains évaporitiques permien qui fournissent des quantités importantes de NaCl et de CaSO₄. Le lessivage des terrils de mines et les rejets d'eaux usées minières peuvent être à l'origine de pollutions métalliques et acides [4].

Des usines et des fermes industrielles déversent dans l'eau douce des quantités parfois considérables de pesticides, d'engrais et d'herbicides.

Le principal ETM (éléments traces métalliques) est le zinc dont les émissions représentent 90% de la charge polluante totale [18].

En Europe occidentale, l'acidification des eaux par les retombées atmosphériques acides dues aux industries, atteint l'ensemble des pays de l'Ecosse à la Finlande, et certaines régions sensibles des Vosges à la Tchécoslovaquie où une chute de deux unités de pH n'est pas rare [4]. Le phénomène d'eutrophisation du au déversement des substances nutritives (azote, phosphore) s'observe dans les grands fleuves, tel la Tamise, le Rhin, et la Loire où la biomasse phytoplanctonique a considérablement augmenté: 10 à 15 mg/l de matière organique, ce qui conduit en aval à une anoxie souvent totale des eaux de l'estuaire [4].

Au Japon, la pollution de l'eau provient des solvants à forte teneur en chlore utilisés par certaines industries. Tous ces déchets ajoutent à l'eau des matières organiques et des substances nutritives excédentaires, comme l'azote et le phosphore qui favorisent la formation d'algues, lesquels diminuent l'oxygène de l'eau [16].

Le plus souvent, la pollution des fleuves est portée à la connaissance du grand public lors des accidents industriels, mettant en jeu d'un seul coup de grandes quantités de polluants. Le nombre de substances organiques peut être estimé à plusieurs centaines de mille, voire plusieurs millions à l'inverse des substances minérales qui correspondent à une liste finie

d'une centaine d'éléments [19]. Plusieurs paramètres permettent d'expliquer la variabilité des teneurs en éléments dans les cours d'eau. Pour Ezeronye et Ubalua, les fleuves ont la capacité de diminuer l'impact visible des déchets par la dilution et la sédimentation [20].

I.3.3- Eau et assainissement

Dans le monde, l'une des menaces environnementales les plus graves pesant sur la santé demeure la consommation prolongée d'eau non potable. Les effets des micropolluants ne dépendent pas uniquement du niveau de concentration dans l'eau, mais aussi de leur accumulation dans l'organisme. Alors que la proportion d'hommes pouvant s'approvisionner en eau de qualité a augmenté de 79% en 1990 à 82% en 2000, il y a toujours 1,1 milliard de personnes qui n'ont pas l'eau potable et 2,4 milliards qui n'ont pas d'équipement sanitaire amélioré [21]. La plupart habitent en Afrique et en Asie. A Jakarta, Bangkok et Manille, d'innombrables effluents liquides et de déchets solides sont jetés dans les cours d'eau et provoquent des maladies comme le choléra, la typhoïde et d'autres infections d'origine hydrique. Le fleuve Mékong, qui prend sa source en Chine et coule à travers le Myanmar (ancienne Birmanie), le Laos, le Cambodge et des régions de Thaïlande et du Viêt-Nam est surchargé de déchets industriels et humains [16]. L'absence d'accès à l'eau potable et à l'assainissement conduit à de centaines de millions de cas de maladie d'origine hydrique et plus de cinq millions de décès chaque année. La toxicité avérée de fortes concentrations des polluants dans l'eau pour les organismes pose un problème de déséquilibre dans le contexte écologique [20].

I.4- Etat de la pollution de l'eau en Afrique

Selon le programme des Nations Unies pour l'environnement [22], les ressources hydriques renouvelables de l'Afrique représentent en moyenne 4050 km³ par an, ce qui représente 5 000 m³ d'eau par an et par personne alors que la moyenne mondiale est de 7 000 m³. La répartition des eaux de surface comme celles des eaux souterraines est inégale ; par exemple la République Démocratique du Congo est le pays le plus arrosé du continent avec une moyenne de ressources hydriques renouvelables internes de 935 km³ d'eau par an, alors que la Mauritanie pays le plus sec a une moyenne de 0,4 km³ [22].

I.4.1- Détérioration de la qualité de l'eau

En Afrique, la nécessité de recycler les eaux usées augmente en raison des pénuries d'eau douces dans certaines régions. La plupart des pays africains ne disposent que de réserves d'eau limitées qui s'amenuisent davantage en raison des sécheresses, de la pollution et de l'accroissement démographique.

La pollution des eaux douces et des eaux souterraines est de plus en plus préoccupante dans beaucoup de pays, car elle limite encore l'accès à l'eau salubre. La mauvaise qualité de l'eau entraîne les maladies, réduit la production et constitue un risque environnemental pour les nappes phréatiques [23].

La mauvaise qualité de l'eau peut nuire au développement économique et touristique du pays. Des études ont montré que 90 % des eaux usées produites dans le tiers monde sont déversées telles quelles dans les fleuves et rivières.

A Abidjan en Côte d'Ivoire la situation est préoccupante dans la lagune Ebrié, qui constitue un des plus grands écosystèmes de l'Afrique occidentale. Des tonnes de polluants sont déversées chaque année dans cette lagune (33 kt, de charge annuelle en 2000) ce qui réduit considérablement la concentration de l'oxygène. Cette chute du taux d'oxygène occasionne fréquemment la mort des poissons [24].

A Ouagadougou au Burkina Faso, en 2000, les égouts et les eaux usées provenant du marché central, des principaux hôtels, de l'hôpital, de la brasserie, des vanneries et de l'abattoir sont évacuées, pour la plupart, sans traitement dans les environs. Les quantités de déchets évacués ont atteint plus de 20 000 m³/an pour les matières de vidange et 600 000 m³/an pour les déchets industriels. Il faut cependant noter une légère amélioration de l'état d'assainissement depuis 2002 grâce au Plan stratégique d'assainissement de Ouagadougou [25] qui est un programme intégré basé sur la stratégie nationale d'assainissement et de promotion de l'hygiène.

En Zambie, le fleuve Kafue a reçu au fil des ans toute sorte de polluants et d'effluents de tous les secteurs du développement économique (exploitations minière, industrielle et agricole). L'écoulement continu de polluants dans le fleuve Kafue a conduit à la détérioration de la qualité de ses eaux: eutrophisation grandissante, augmentation de la concentration des métaux lourds et diminution de ressources halieutiques. Beaucoup d'études ont révélé des concentrations élevées de cobalt et de cuivre dans l'eau et dans les poissons [26] [27].

Au Nigeria, une étude faite sur la qualité des eaux de surface par Asonye et *al*, [28] a révélé que sur 72 rivières étudiées 93% ont une turbidité au dessus de la norme standard de l'OMS et de la CEE (5 NTU) et 81% ont un pH inférieur à 6,5. La turbidité atteignant le seuil de 344 NTU. Quant aux métaux lourds, 47% et 15 % des échantillons contenaient respectivement un niveau très élevé de cadmium et de chrome.

A Kampala en Ouganda, les usines installées à proximité du lac Victoria constituent un impact de pollution sur la qualité des eaux du lac. Plusieurs villes du Kenya, de la Tanzanie et de l'Ouganda déversent des millions de litres d'eau usées et de déchets industriels dans le lac Victoria. Selon Hannington et *al*, [29] une usine de tannerie à Jinja produit des eaux résiduaires dont la concentration en Cr (VI) atteint 264 mg/l.

Le traitement des eaux usées constitue une part très importante de la gestion des ressources en eau. Dans cette perspective, le recyclage et la réutilisation des eaux peut apporter une importante contribution aux ressources en eau des villes industrialisées [30].

I.5- Etat de la pollution de l'eau au Tchad

I.5.1- Géographie, contexte démographique

Le Tchad est situé entre les 8^{ème} et 24^{ème} degré de latitude Nord et entre les 13^{ème} et 24^{ème} degré de longitude Est, en plein cœur d'Afrique. Il a une superficie de 1 284 000 km² et s'étend du Nord au Sud sur 1700 km et de l'Est à l'Ouest sur 1200 km. Il est de ce fait le 5^{ème} pays d'Afrique par sa superficie après le Soudan, l'Algérie, la République Démocratique du Congo et la Libye. Le Tchad est limité au Nord par la Libye, au Sud par la RCA, à l'Est par le Soudan et à l'Ouest par le Niger, le Nigeria et le Cameroun. Selon les derniers recensements de la population et de l'habitat, la population du Tchad est estimée à 11 274 106 d'habitants (*INSEED, 2009*).

Pays continental enclavé, le Tchad comporte trois grandes zones géoclimatiques (saharienne, sahélienne et soudanienne) du nord au sud où la répartition très différenciée des ressources naturelles en eau, en terre cultivables et en biomasse détermine depuis toujours la distribution spatiale de la population:

- la zone saharienne, 780 000km², concerne la partie nord du territoire tchadien. Elle est caractérisée par une faible pluviométrie, souvent inférieure à 100 mm. Les principales caractéristiques du climat sont la quasi-permanence des vents desséchants et les hautes

températures diurnes. La zone saharienne est marquée par une végétation très rare, à l'exception des oasis où toute la vie se concentre;

- la zone sahélienne d'une superficie de 374 000 km² correspond à la portion comprise entre la zone saharienne et le bassin versant du Chari-Logone situé entre N'Djamena et Bongor. Les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 300 et 650 mm. Le climat est sahélien. La végétation caractéristique est dominée par des épineux, particulièrement des acacias;
- la zone soudanienne d'une superficie de 130 000 km² couvre toute la région méridionale du pays jusqu'au sud du Bongor. Les précipitations moyennes annuelles se situent entre 650 mm et 1000 mm. La zone soudanaise est caractérisée par une végétation dense (Annexe 1).

I.5.2- Hydrographie du Tchad

Le Tchad est une cuvette encerclée par une demi-couronne de montagnes et de plateaux. Au nord, le massif du Tibesti atteint une altitude élevée (volcan de l'Emi Koussi, 3415 m). A l'est, le plateau gréseux du Ouaddaï culmine à 1360m. Au centre-est, le Mont Guéra, 1615 m. La zone la plus basse est (280 m) est occupée par le Lac Tchad. Le relief du Tchad est accidenté: des plaines alternent avec des montagnes plus ou moins hautes.

Le réseau fluvial au Tchad est caractérisé par des précipitations extrêmement saisonnières, et des variations annuelles de température. La période des années 70 est marquée, par une succession de grandes sécheresses ; la vulnérabilité du Tchad face à une pluviométrie déficitaire et irrégulière réduit ainsi le réseau hydrographique en volume et en superficie. Les cours d'eau permanents entretiennent une humidité quasi constante qui permet le développement des forêts galeries, véritables gîtes des vecteurs pathogènes. En effet, l'incidence de nombreuses maladies vectorielles s'atténue avec l'éloignement des points d'eau, tant il est vrai que la carte des parasitoses est souvent marquée par celle du réseau hydrographique (*INSEED, 2009*). Le seul réseau fluvial permanent est constitué par les fleuves Chari et Logone.

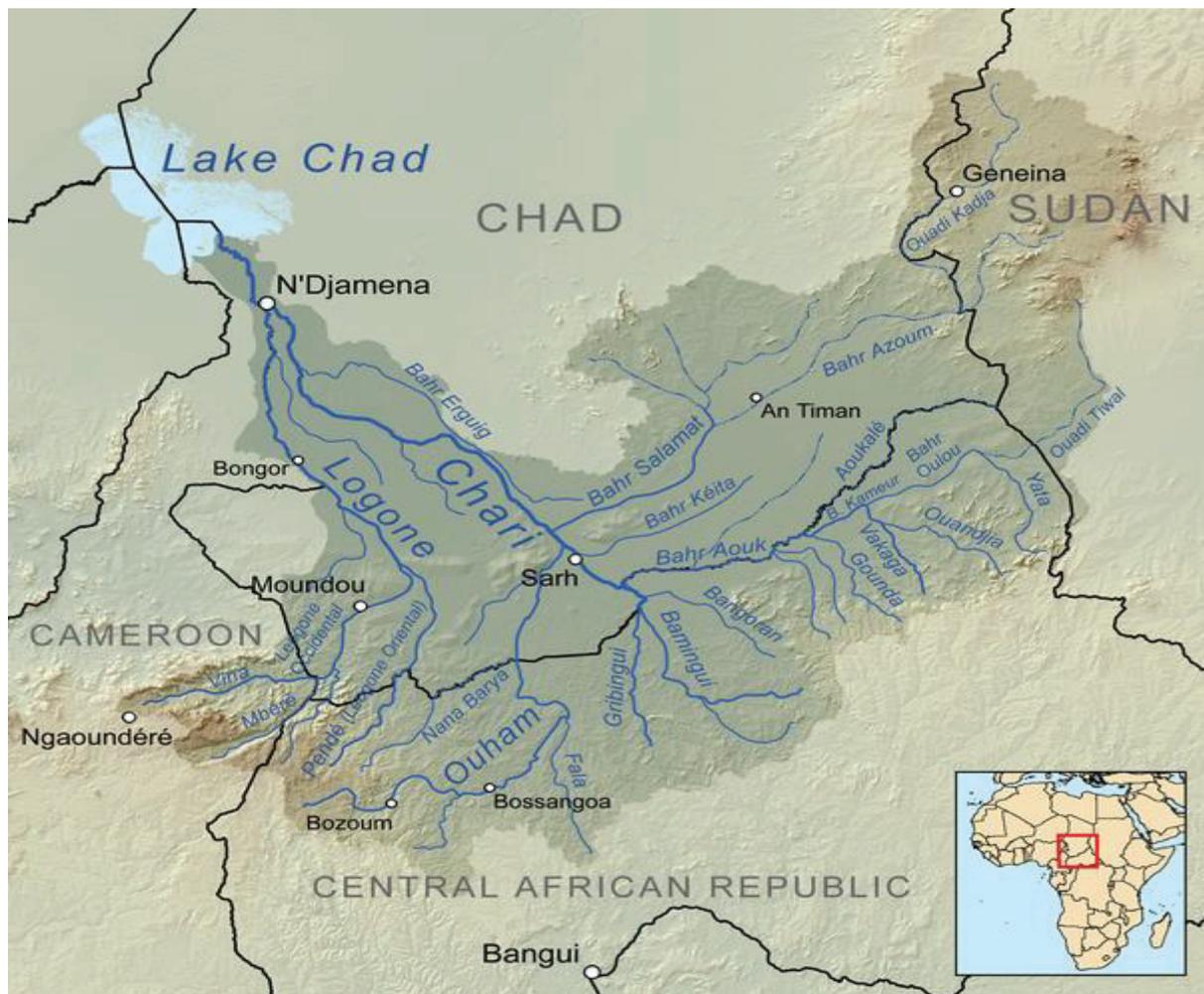


Figure 1.1. Carte de l'hydrographie dans le bassin versant du Chari et du Logone (ADT/PAS CBLT 2006)

Le Chari 1200 km dont 800 km au Tchad, est le plus important des cours d'eau tchadiens. Le Chari prend sa source en République Centrafricaine et se jette au Lac Tchad après avoir traversé toute la zone soudanienne et la zone sahélienne. A son entrée au Tchad, le Chari est constitué par la réunion de Bamingui (356 km de long), du Gribingui (418 km) et du Bangora (355 km) trois cours d'eau situé en République Centrafricaine qui drainent un bassin de 80 000 km². Le Chari représente 90% des apports en eaux du Lac Tchad. Il est caractérisé par une faible pente (0,1 m/km entre le confluent du Bahr Aouk et le Lac Tchad, 826 km) entraînant une dégradation hydrographique marquée (défluent, plaine d'inondation) [31]. Le Chari et ses affluents sont caractérisés par des pointes de crues et des étiages prolongés. En période d'étiage, le Chari se réduit à de petits filets d'eau. La crue la plus forte a été observée à la station de référence de N'Djamena en 1961. Cette crue a les caractéristiques

hydrologiques exceptionnelles. Le volume d'eau écoulé au Lac Tchad était de 53,7 milliards de mètre cube. Le débit maximum en cette année était de 5160 m³/s avec une hauteur maximum de 9,10 m. La crue la plus faible a été observée en 1984. Le volume d'eau écoulé était de 6,7 milliards de mètre cube soit 8 fois moins que la crue exceptionnelle de 1961. Le débit maximum était de 773 m³ avec une hauteur maximale de 3,02 m d'après « Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement du Tchad », 2003. HCNE-MEE-PNUD-DAES.

La majorité des habitants du Tchad sont riverains du Chari ou de ses affluents: le Bahr Sara, le Bahr Aouk, le Bahr Keïta, le Bahr Salamat et le Logone. Le Chari traverse les villes de Sarh, Guelendeng et N'Djamena.

Le Logone 960 km prend sa source au Cameroun et se jette dans le Chari à N'Djamena après avoir traversé les villes de Doba, Moundou, Laï et Bongor. Le Logone est formé par la réunion de deux rivières, issues du massif de l'Adamaoua au Cameroun: la Vina et la Mbéré qui confluent à la frontière entre les deux pays.

Le Lac Tchad. Le Lac Tchad, dont les eaux sont partagées entre le Niger, le Tchad, le Nigeria et le Cameroun, se présente en position perchée dans le bassin tchadien puisque son niveau moyen est estimé à 282 m, alors que les régions au nord-ouest de Koro Toro donnent des côtes minimales de l'ordre de 165 m [31]. Les principaux apports du Lac Tchad proviennent du Chari (90%) et du Logone. Du fait de sa situation dans un bassin endoréique, le niveau du Lac Tchad dépend étroitement du climat et des précipitations sur son bassin versant. Le Lac Tchad avait une superficie de 25 000 km² à la fin des années 60. Aujourd'hui sa superficie représente 5 000 km². Les quatre cinquième de cette réserve en eau, l'une des rares que possède l'Afrique de l'Ouest, ont disparu. L'eau du lac Tchad s'est évaporée en raison de conditions climatiques très dures, notamment pendant les périodes de sécheresse de 1972-1973 et 1982-1984. Le climat actuel contribue toujours à l'assèchement du lac puisque les précipitations dans cette région du sud du Sahara sont, elles aussi, en forte diminution.

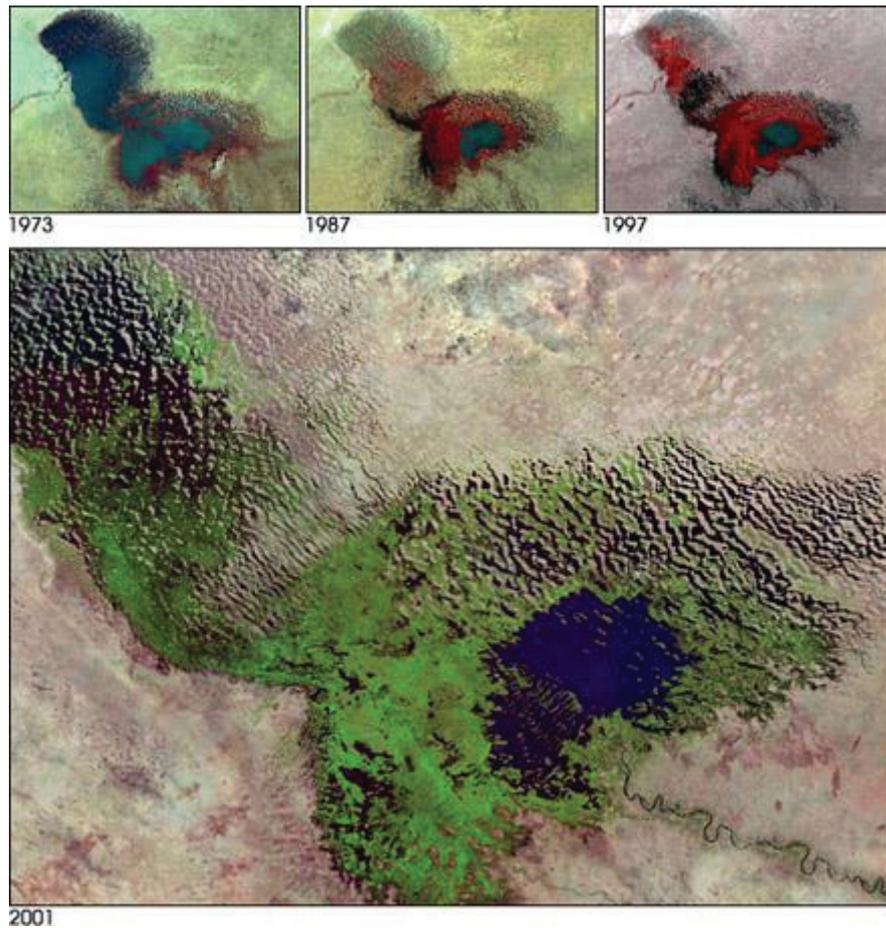


Figure 1.2. Rétrécissement du Lac Tchad. Source NASA 2001, images Landsat

I.5.3- Climat, pluviométrie et végétation

Le climat contribue actuellement à l'assèchement des rivières, fleuves et lacs, donc à une détérioration de l'état de santé de l'ensemble des hydrosystèmes de surface puisque les précipitations sont en forte diminution. Le découpage de l'année en saisons se caractérise, au Tchad, par l'alternance d'une saison sèche dont la longueur varie de 9 mois au nord à 6 au sud et d'une saison humide de mai à octobre au sud et de juillet à septembre au nord. Le climat tchadien est contrôlé par l'affrontement de deux masses d'air provenant des zones de hautes pressions sahariennes au nord et de Saint Hélène au Sud. Le vent soufflant à partir de la haute pression saharienne est l'Harmattan, chaud et sec. Ce vent venu du nord-est a un effet desséchant qui accentue l'effet des températures élevées qui règne en avril-mai sur l'ensemble du pays. Celui venant de l'Atlantique est frais et humide. C'est la Mousson, facteur dominant de la saison des pluies, qui est propulsée vers le nord par l'alizé austral, atteignant ainsi la latitude de N'Djamena au courant du mois de mai. La masse d'air provenant de la zone de haute pression saharienne passe au-dessus de la masse d'air de basse pression océanique. La

zone d'affrontement constitue l'équateur météorologique ou encore zone de Convergence Inter-Tropicale au niveau de laquelle se forment les nuages et dont la trace au sol est le FIT (Front Inter Intertropical) [32]. A partir d'avril, la légère remontée du FIT donne lieu à des précipitations au 8^{ème} degré nord dans la partie méridionale du pays. Dans sa progression saisonnière, le FIT atteint sa position septentrionale la plus avancée (20°-22° nord) en juillet-aout, mois pendant lesquels tombent environ les trois quart des précipitations annuelles. Le type de climat au Tchad s'explique par les déplacements au cours de l'année de la zone d'affrontement des vents. Ainsi, du sud au nord les ressources en eau de surface et la pluviométrie décroissent. La durée de la saison des pluies diminue de façon considérable. Les précipitations, en moyenne, de 1200 mm au sud diminuent graduellement jusqu'à devenir presque nulles à l'extrême nord du pays (figure.1.3).

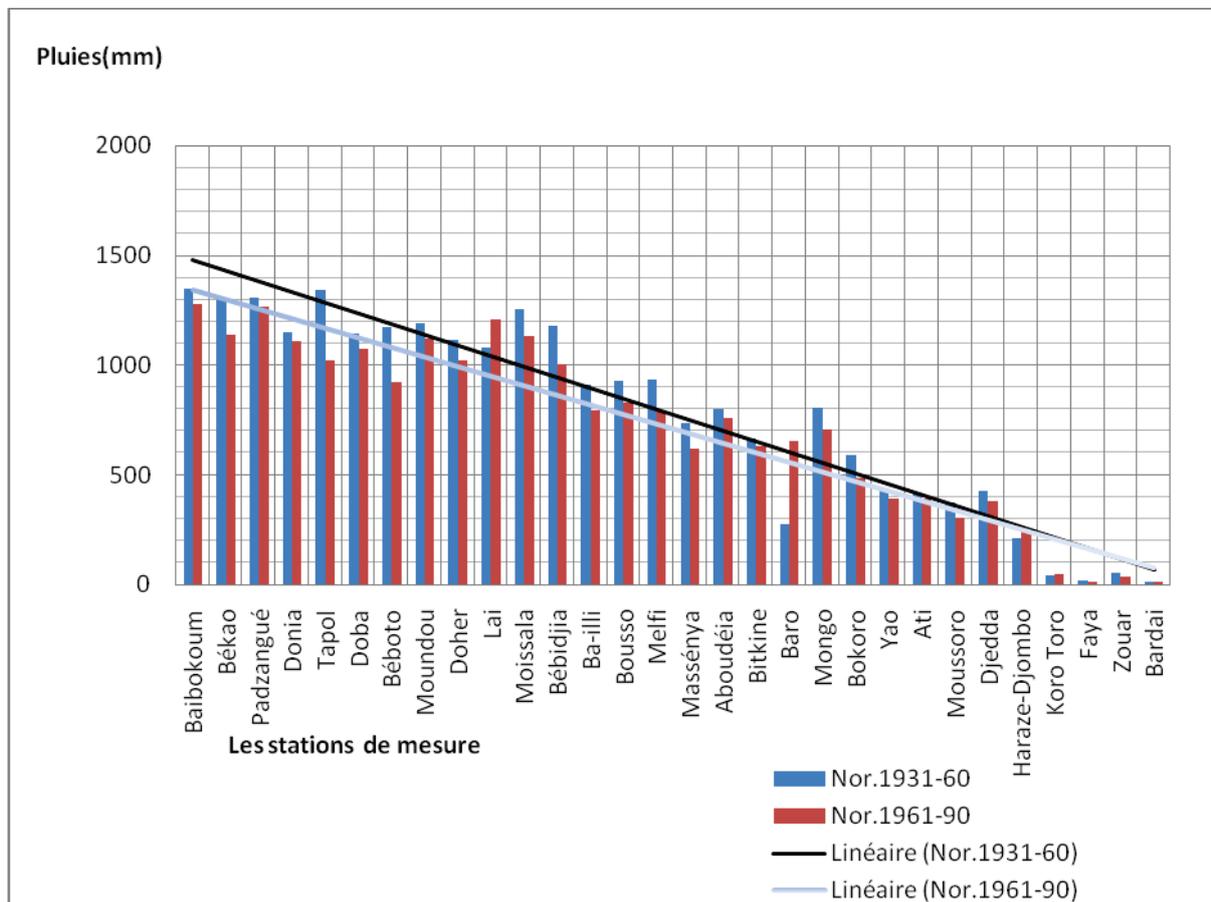


Figure 1. 3. Variation des normales pluviométriques suivant les latitudes du Sud au Nord.

Les précipitations sont à l'origine des eaux superficielles courantes ou stagnantes. Les données obtenues au service météorologique montre une distribution maximum des pluies en Juillet et en Aout et une durée plus importante vers la zone méridionale (Sud) (Pluviométrie en 2007). La pluviométrie est très variable d'une année à l'autre (figure1.4). La moyenne

annuelle calculée sur 38 ans est de 524 mm de pluie. Il y a des années très sèches (1973, 1984, 1990) et des années assez humides (1975, 1988).

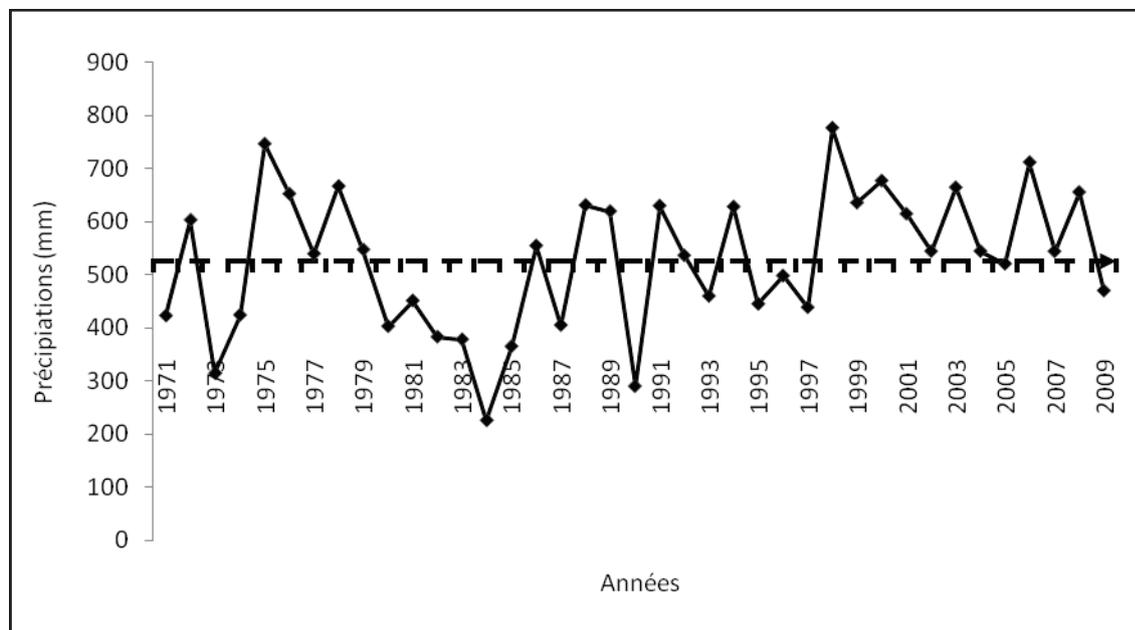


Figure 1.4. Précipitations annuelles à N'Djamena (1971 à 2009). Source DNM

La distribution et l'évolution des isohyètes sont présentées à la figure 1.5. En comparaison aux années 1960 on constate un net décalage vers le sud des isolignes, avec une baisse de la quantité totale de précipitation, ce qui correspond à une décroissance de 100 à 130 mm dans l'ensemble du pays au sud du 14^e parallèle.

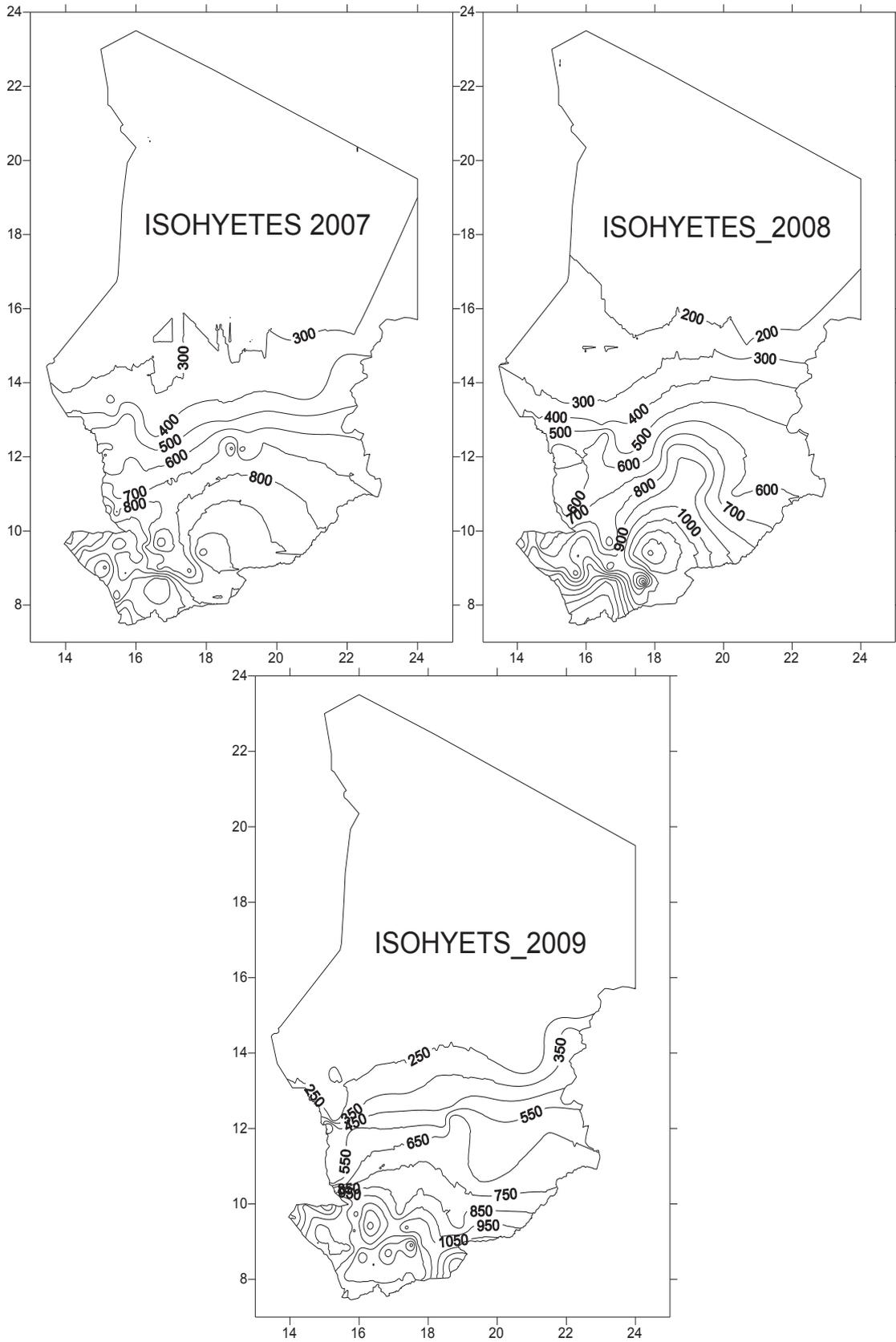


Figure.1.5. Carte des isohyètes annuelles de la République du Tchad en année moyenne (2007, 2008, 2009). Source DNM

Tous ces phénomènes ajoutés à l'augmentation de la température, de la rareté de la végétation (activité humaine, fabrication de charbon de bois) et de l'avancée du désert ont été observés à partir des années quatre-vingt. Ce qui a abouti au lancement d'importants programmes de reboisement dans toute l'étendue du territoire.

Le volume et le débit du Chari sont tributaires de la pluviométrie. Lorsque la pluviométrie est abondante, le Chari sort de son lit et provoque des inondations. Le débit annuel varie entre 1,3 et $3,9 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ (source ADT-CBLT, 2006).

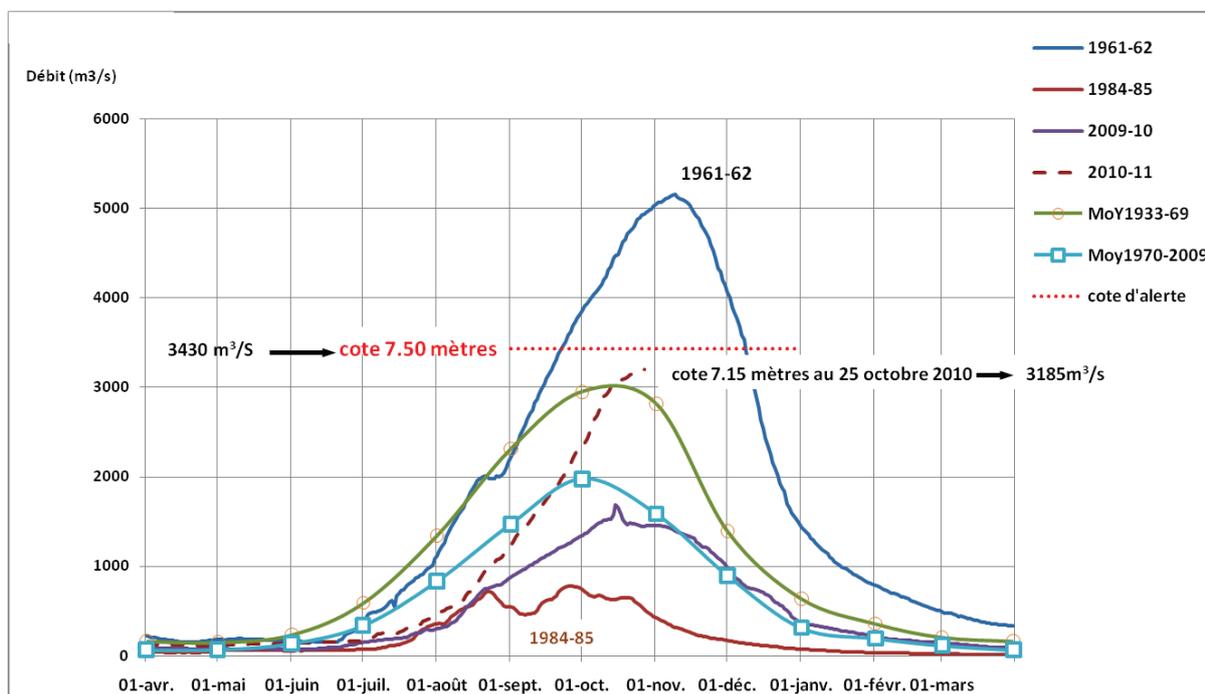


Figure 1.6. Courbes de crues de références du Chari (DNM)

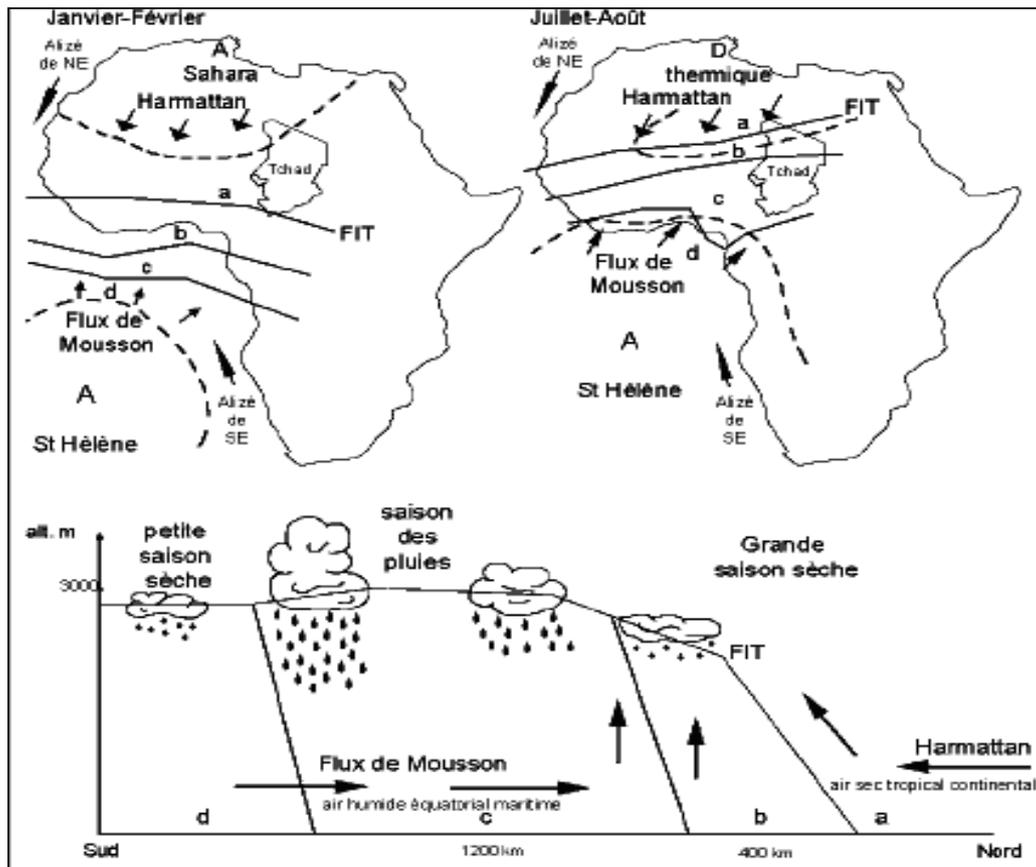


Figure 1.7. Schéma des principaux flux de masse d'air en Afrique de l'ouest et coupe nord sud de la troposphère avec la localisation des zones pluvieuses au sol.

- Zone sans pluie; b- zone avec des orages isolés; c- zone où domine les lignes de grain et les «pluies de mousson»; d- zone avec des pluies réduites (d'après Olivry et al., 1996; Roche 1980).

Sur l'ensemble du Tchad, les températures les plus basses se situent en décembre et février en raison de la plus faible incidence des rayons solaires pendant cette période. Les mois de décembre et janvier sont les plus frais. Les températures les plus hautes se situent entre mars et mai. L'apparition des premières pluies atténue l'incidence des rayons solaires, ainsi les températures baissent pour atteindre un minimum à la période où les pluies sont les plus abondantes c'est-à-dire entre les mois d'août et septembre avant d'augmenter de nouveau avec la diminution des pluies. La figure 1.8 représente les moyennes mensuelles des températures à N'Djamena.

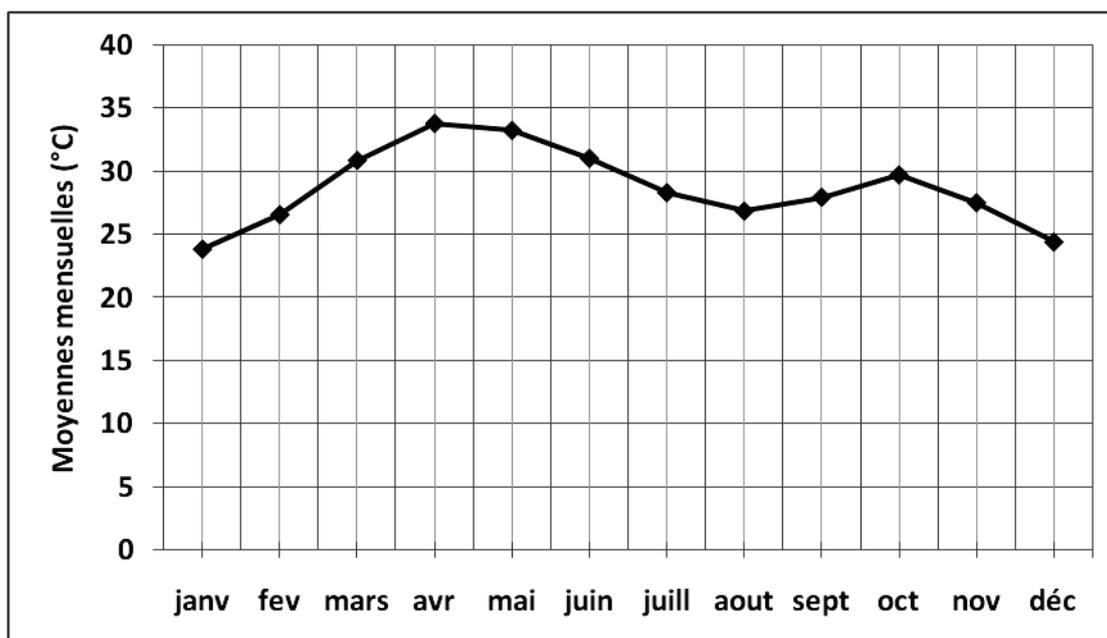


Figure 1.8. Température moyennes mensuelles à N'Djamena (24 ans) Source DNM

I.5.4- Eau, hygiène du milieu et assainissement

Au Tchad, le manque d'eau potable dans certaines régions constitue d'une part un sérieux problème de santé et d'autre part favorise l'apparition de certaines maladies telles que le choléra, la fièvre typhoïde, etc. Beaucoup de population vivent dans des conditions d'assainissement et d'hygiène insalubres. Les annuaires statistiques sanitaires du Tchad montrent que le manque d'eau potable et les conditions défavorables d'hygiène sont les principales causes de la mortalité et de la morbidité au sein de la population. Les pathologies dominantes qui constituent les problèmes de santé publique sont le paludisme (49% chez les enfants), la bilharziose, la diarrhée (44 % chez les enfants), la méningite, le tétanos, la rougeole, etc.

On note au Tchad une quasi absence des réseaux d'assainissement pour collecter et éloigner toutes les eaux, quelles que soient leurs origines. Les réseaux à ciel ouvert (comme au moyen âge en France) drainent des eaux qui ne constituent pas seulement une nuisance pour la vue et l'odorat, mais aussi un risque considérable de contamination bactérienne, moins visible mais tout aussi réel. En effet, le rejet en pleine rue des eaux usées est à l'origine de beaucoup d'épidémies dont les plus grandes ont laissé des traces dans l'histoire (le choléra, le paludisme, les infections respiratoires aiguës, les maladies diarrhéiques, les parasitoses

intestinales, la rougeole, etc.). Dans les pays en voie de développement, les principaux problèmes de santé sont causés par une hygiène médiocre due à l'insuffisance d'eau et à la consommation d'eau contaminée. L'organisation mondiale de la santé estime en effet que 80 % des maladies de la population mondiale sont directement associées à l'eau: on retrouve ainsi en permanence 400 millions de personnes atteintes de gastro-entérite, 200 millions, de schistosomiase (bilharziose), 160 millions de paludisme et 300 millions, d'onchocercose. Par ailleurs les eaux polluées sont responsables de 50 % de cas de mortalité infantile [10].

Les déchets solides, une des causes de la dégradation, souvent irréversible, du milieu et des ressources traduit le fait que cette question n'est pas encore traitée avec le niveau d'efficacité requis. Les déchets sont souvent exposés aux pluies produisant ainsi des lixiviats très contaminants qui rejoignent les cours d'eau et la nappe. Les déchets solides sont exposés aux vents, transportant papiers, plastiques ainsi que les odeurs à des distances importantes. Il faut 100 ans à un sac en plastique pour se décomposer dans le sol et 450 ans pour se décomposer dans l'eau. On trouve ces sacs partout dans les fleuves, lacs et rues. Ils obstruent les réseaux de drainage, tuant toute vie aquatique. Dans les grandes villes la collecte pour l'élimination ultime des déchets solides connaît des insuffisances. On a observé récemment à N'Djamena un effort de la mairie qui a réussi à mettre en place une politique en matière de collecte de déchet. Des bennes compacteuses sillonnent les quartiers de N'Djamena. Ceci est encore insuffisant car les espaces urbains subissent une dégradation inquiétante due aux insuffisances en infrastructures de base et aux conditions de l'habitat qui constituent l'origine principale de la dégradation de la salubrité du milieu.

I.5.5- Le couvert végétal

Les forêts jouent un rôle capital dans la protection et la purification des ressources d'eau douce. Les forêts absorbent les agents polluants et limitent les inondations. L'analyse des documents historiques montre que dans des années 1950, les forêts couvraient une grande partie du territoire tchadien. C'est surtout au début des années 1980 que la surexploitation des couverts arbustif et forestier s'est intensifiée pour répondre aux besoins des grandes villes et de l'agriculture [33]. Ceci a entraîné à la fois un recul important du couvert arbustif et l'avancée impitoyable du désert. L'utilisation abusive de bois de chauffe comme source d'énergie a une incidence majeure sur la dégradation du tissu végétal, la qualité du sol et leur résistance à l'érosion éolienne et à l'érosion pluviale. Le couvert végétal et forestier au Tchad est estimé à 21 millions d'hectare soit 18 % du territoire.

I.5.6- Les écosystèmes aquatiques

Le secteur des pêches est l'un des secteurs qui offraient au Tchad des potentialités très appréciables. Le patrimoine halieutique était important et bien diversifié. Rationnellement exploitée, la pêche pourrait énormément contribuer à l'économie du pays. Jusqu'en 1970, on estimait que le Tchad se classait au 5ème rang africain par le volume de sa pêche avec environ 110.000 tonnes par an. Ce qui constituait en termes de contribution à l'économie nationale, le 3ème secteur d'activité du pays après l'agriculture et l'élevage. Aujourd'hui, il y a une tendance à l'affaiblissement du rôle de la pêche dans l'économie du Tchad due à l'appauvrissement des ressources piscicoles. Mais les raisons profondes sont à rechercher dans les causes climatiques. Peut être, la baisse de niveau des eaux dans les cours d'eau et lacs par insuffisance de la pluviométrie, aurait empêché la remontée des poissons du grand réservoir qu'est le Lac Tchad vers les régions situées en amont du bassin tchadien. Selon le rapport d'une étude réalisée par Laoubeul Dara (2003) sur les ressources halieutiques du bassin du Lac Tchad, il existe des menaces qui pèsent sur la diversité spécifique aquatiques avec une grande perturbation des habitats et ce, en raison des facteurs humains, bioclimatique et géophysique. Par exemple, à travers les études antérieures réalisées par ORSTOM [34], l'on a recensé 173 espèces pour 26 familles alors que les récentes études n'en parlent que de 47 espèces de poissons recensées. Ce qui montre un pourcentage significatif des poissons disparus. Un constat tout à fait exceptionnel est celui de la rareté d'une espèce, le *Corydoras paleatus*, qui, il y a dix ans inondait le marché de N'Djamena pendant la saison de pluies. Cette espèce avait un mode de reproduction très important pendant la période de crue, c'est à dire en juillet, août et septembre.



Photo 1.1 L'écosystème du Logone eutrophié (Photo LABEEN, 2004)

Le fonctionnement des systèmes aquatiques est contrôlé pour l'essentiel par le régime hydrique couplé avec le rythme des saisons. La pression démographique et urbaine combinée à la fragilité des écosystèmes rend ces derniers extrêmement vulnérables. Beaucoup d'espèces de poissons ont un cycle de reproduction réglé par la crue de fleuve. Lorsque les crues du fleuve sont insuffisantes, la reproduction des ressources halieutiques est très fortement affectée [34].

I.6- Industries : procédés de fabrication et typologie de rejets liquides

produits

Au Tchad, le degré d'industrialisation varie beaucoup selon les régions. La répartition des grands établissements industriels met en relief les mêmes zones (le sud et N'Djamena), mais également quelques entreprises situées dans ou à proximité d'agglomérations importantes.

Les industries au Tchad sont concentrées à N'Djamena, Moundou et Sarh. Les rejets de ces industries en termes de volume d'eau usées et de composition chimique ne sont pas connus, puisque aucune publication sur la caractérisation des polluants n'est faite dans le secteur industriel. Ces établissements fonctionnent 24 heures sur 24 et disposent tous des équipements de base permettant aux personnels et aux visiteurs de satisfaire leur besoins physiologiques. On peut notamment citer: les dispensaires, les cafétérias, les toilettes, les laveries, les laboratoires, les unités de chauffage et de climatisation, les garages, etc.

L'ensemble de ces équipements et des différentes activités nécessitent un approvisionnement en eau potable adéquat et génèrent des eaux usées, et des déchets solides qui se mélangent aux eaux usées produites par l'usine et se déversent graduellement dans le fleuve. Le volume d'eaux résiduaires, d'odeur nauséabonde, peut varier considérablement suivant le type d'entreprise et les procédés de fabrication employés; c'est pourquoi il est difficile d'indiquer des chiffres généralement valables.

Pour le fonctionnement des machines, tous les établissements utilisent les produits de lavage et de nettoyage généralement consommés en grande quantité et systématiquement rejetés dans les fleuves.

Le Chari et le Logone ont enregistré au cours des dernières années de profondes modifications dues à des multiplications des actions industrielles induisant des changements dans la qualité des eaux. Les activités industrielles, par le biais des émanations gazeuses ou par les rejets liquides ou solides, ont causé l'augmentation des flux des polluants organiques (pesticides hydrocarbures, médicaments) et inorganiques (sodium, chlorure, sulfate, phosphate, azote, métaux, métalloïdes) dans les eaux.

Les polluants introduits dans les milieux aquatiques sont susceptibles de se concentrer chez les organismes vivants à des niveaux parfois supérieurs à leurs taux dans le biotope (eau et sédiment) et peuvent entraîner des problèmes d'ordre écologique, sanitaire et économique.

I.6.1- Typologie des effluents liquides industriels

Les établissements industriels produisent trois types de rejets liquides:

- i.** les rejets d'origine domestique provenant des cuisines, des activités de blanchisserie;
- ii.** les effluents générés par les activités de soins, des analyses médicales qui sont très spécifiques aux hôpitaux. Les rejets peuvent contenir des produits chimiques, des liquides biologiques, des résidus de médicaments, des déjections et excrétion, des détergents et des désinfectants [35] ;
- iii.** Les rejets industriels provenant de la transformation des matières premières, des garages et des ateliers contenant un volume important d'huiles, de détergents, de peintures, d'acides et ses sels, de restes de produits bases organiques, des métaux, des hydrocarbures et des produits secondaires de réactions des diverses substances.

I.6.2- Industrie de transformation de la canne à sucre : CST

Créée sous le nom de société sucrière du Tchad, devenue ensuite SONASUT, la CST a pour objectif primordial la culture de canne à sucre et la production du sucre raffiné en morceaux ou en pains et des bonbons à partir de la canne à sucre nécessaire destiné à la commercialisation. La CST dispose de deux usines, une à Sarh et une autre à N'Djamena. L'épuration du jus trouble se fait par voie mécanique et chimique. L'épuration chimique se fait par précipitation d'une partie de substances non sucrées dissoutes et en suspension dans le jus suivie d'une séparation de précipité.

Eaux résiduaires : Elles proviennent du lavage de la canne à sucre, de la chaufferie, de l'épuration du jus aux postes d'évaporation et de cuisson, de raffinage, de fabrication d'alcool, de levure, de papier ou de panneaux agglomérés, de nettoyage de la cour, des bâtiments et des eaux pluviales. Les effluents sont généralement très chargés en matière organique. Ils ne devraient en aucun cas être déversés dans le milieu récepteur (le fleuve) même après une épuration biologique.



Photo 1.2 Eaux résiduaires de la CST déversées sans traitement dans le Chari à Sarh
(Photo LABEEN, 2004)

I.6.3- Egrenage et textile : Cotontchad et Cotex

I.6.3.1- Egrenage

La COTONTCHAD dispose d'une dizaine d'industries d'égrenage réparties dans la zone méridionale. Les usines d'égrenage séparent le coton du grain après élimination des corps étrangers et procèdent à l'emballage pour l'exportation. Le coton est une fibre végétale très économique constituée en majeure partie de cellulose. Pour pouvoir utiliser la fibre, les constituants non cellulosiques doivent être éliminés. Le coton brut ou de préférence la filasse et les fibres, sont d'abord bouillis dans des lessives alcalines de carbonate de sodium et d'hydroxyde de sodium. Cette opération, qui permet d'éliminer les pectines contenues dans le coton, est suivie par le blanchiment dans des solutions diluées de chlorure de calcium et d'autres composés chlorés, suivis d'un traitement aux acides dilués. Après chaque opération, les matières traitées sont abondamment rincées à l'eau. La teinture du coton nécessite l'utilisation de quelques produits chimiques tels que la formaldéhyde, de l'eau et de l'énergie. L'égrenage est un procédé très mécanique, généralement accompagné de nuisance acoustique et de poussières importantes.

I.6.3.2- Le textile

Autrefois appelée STT (Société Textile du Tchad), la COTEX (Compagnie Tchadienne de Textile) fabrique des tissus à partir du coton traité par la COTONTCHAD. La COTEX a cessé ses activités il y a une dizaine d'années à cause des crises économiques que le Tchad a connues. La société a repris ses activités il y a quelques mois. Le même procédé de traitement de coton de la COTONTCHAD est utilisé par la COTEX mais avec beaucoup de rigueur pour la fabrication des fibres.

Eaux résiduaires : On note une consommation excessive d'eau et une grande quantité d'eau résiduaire. La plupart des matières dont sont chargées les eaux résiduaires sont biodégradables. Il est néanmoins possible que certains composés parvenant dans les cours d'eau entraînent lors de leur dégradation une baisse du taux d'oxygène en dessous du seuil requis et déclenchent un processus de putréfaction de l'eau. Dans les eaux résiduaires, il y a différents types de polluants:

- colorants de certains tensioactifs difficilement dégradables,
- matières décantables,

- métaux lourds: cadmium, mercure (introduit par la soude caustique et l'acide chlorhydrique), chrome (procédé de teinture), cobalt, cuivre et zinc,
- hydrocarbures qui constituent une charge polluante plus préoccupante (opération d'huilage),
- composés organochlorés,
- agents de surface/détergents,
- température de l'eau,
- pH: l'entreprise rejette des eaux en partie acide et en partie alcaline. Le pH des eaux résiduelles du coton est généralement alcalin.

I.6.4- Huilerie

L'huilerie installée à Moundou est sous la tutelle de la COTONTCHAD et fabrique de l'huile pure et raffinée à partir d'arachide et de grains de coton.

L'huile est extraite par un solvant, l'hexane (poison pour le système nerveux et préjudiciable pour l'environnement), et récupérée sous forme de miscella qui est un mélange d'huile et de solvant. Le traitement des graines oléagineuses ou de certaines parties des plantes oléagineuses se fait en trois phases : extraction de l'huile, raffinage de l'huile et éventuellement, le conditionnement de l'huile. Le raffinage permet d'améliorer le goût, la conservation, l'aspect et la digestibilité.

Les eaux résiduelles : Le lavage d'une tonne d'huile végétale nécessite 0,9 m³ environ d'eaux de lavage et produit environ 0,17 m³ d'eaux résiduelles contenant de l'acide sulfurique. Les eaux résiduelles contiennent les substances suivantes: sulfate de sodium, phosphate de calcium, acide gras, mono di triglycérides, glycérine, protéine lécithine, aldéhydes, cétones, lactones stérols.

I.6.5- Savonnerie

Filiale de la COTONTCHAD, la savonnerie fabrique du savon de linge à partir de l'huile de coton et de la soude. L'ensemble des sous-produits (glycérine) et résidus des additifs (agents anticalcaires, phosphates, conservateurs...) sont directement rejetés dans le Logone où ils constituent un problème pour l'environnement car ils sont non biodégradables. Les sous-produits et résidus des additifs contiennent des substances nutritives (phosphore et azote) qui

peuvent favoriser la prolifération d'algues et contribuer à un vaste éventail de problèmes liés à la qualité de l'eau.

I.6.6- Les brasseries

Deux brasseries sont implantées au Tchad dont l'une à Moundou et l'autre à N'Djamena. Ces brasseries fabriquent de la bière à partir du riz, du houblon et du malt. Les brasseries du Tchad (N'Djamena) fabriquent des boissons sucrières gazeuses et exploitent de l'eau minérale des forages. Le processus de fabrication de la bière implique l'utilisation de grande quantité d'eau. Pour le lavage et le nettoyage, les brasseries utilisent des produits chimiques tels que la soude caustique, l'eau de Javel et l'acide nitrique. Les effluents peuvent atteindre les caractéristiques suivantes: variation de pH de 0,8 à 13 ; température variant entre 20 et 50°C.

Eaux résiduaires : Les eaux résiduaires des brasseries contiennent:

- les matières organiques solubles,
- les matières en suspension insolubles (levure...)



Photo 1.3. Les eaux résiduaires des Brasseries déversées dans le Chari à N'Djamena

I.6.7- Les abattoirs

La SMA (Société Moderne des Abattoirs) a pour principale activité l'abattage, la conservation et le transport des carcasses du gros et du petit bétail permettant d'approvisionner en viande fraîche la capitale du Tchad et bien d'autres pays déficitaires en produits carrés. La SMA a une source d'alimentation en eau indépendante de la Société Tchadienne d'Eau et d'Electricité (STEE). Elle possède deux forages; un forage principal et un forage secondaire qui produisent de l'eau propre alimentant la société.

Eaux résiduaires : Les matières contenues dans les eaux résiduaires des abattoirs sont : le sang, le plasma, le contenu des panses, les débris d'intestins et de peaux, les désinfectants, les urines, les excréments...La plupart du fumier des abattoirs est utilisé comme engrais sans traitement préalable ou contrôle de qualité (arsenic, antibiotique, phosphore...). Le risque principal des eaux résiduaires des abattoirs est le risque microbiologique (parasites, bactéries et virus). Cependant il ne faut pas sous estimer le risque chimique d'une part à l'azote (nitrate) et au phosphore et d'autre part aux polluants émergents (résidus des médicaments).



Photo 1.4. Exutoire des abattoirs frigorifiques de N'Djamena

I.6.8- Les centrales électriques : la STEE

Cinq centrales électriques sont installées dans les cinq principales villes à savoir N'Djamena, Moundou, Sarh, Abéché et Faya-Largeau. La STEE (Société Tchadienne d'Eau et d'Electricité) distribue l'électricité et l'eau exploitée des forages.

Eaux résiduelles : Les eaux usées de la centrale peuvent contenir des matières en suspension, des sels, des métaux lourds, des acides, des hydrocarbures, des alcalins, de l'ammoniac et de l'huile.

I.6.9- Constructions mécaniques, ateliers

En dehors des petites entreprises des particuliers (garage de réparation des automobiles, tôlerie, ateliers de soudure, mise en peinture, électrodéposition, soudage...) toutes les industries au Tchad, pour leur autonomie, abritent des ateliers de réparation et d'entretien.

En vue d'un traitement de surface, d'un encollage etc., les pièces à usiner sont débarrassées de l'huile, de graisses, de la résine, de la cire, de la cellulose, du caoutchouc ou de matières plastiques grâce aux solvants.

Le soudage : Les procédés de soudure dégagent entre autre les substances polluantes suivantes : le plomb (PbO), le chrome (Cr), le cadmium (CdO), le cuivre (CuO), le manganèse (MnO), le nickel (NiO), l'azote (NO₂), le zinc (ZnO). On trouve également l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), l'oxyde de fer (III) (Fe₂O₃), les ions fluorures (F⁻), l'oxyde de calcium (CaO), l'hydroxyde de sodium (Na₂OH), l'oxyde de titane (TiO₂), l'oxyde de vanadium (V₂O₃) [37].

La mise en peinture : La plupart des peintures contiennent d'importantes quantités de solvants (organiques) à base d'hydrocarbures ou d'hydrocarbures chlorés et des substances colorantes très finement repartis, les pigments (toxiques). Les peintures contiennent de l'amiante et des métaux pour la protection des ouvrages contre la corrosion.

Huiles de vidange : Minérale ou synthétique, l'huile de vidange s'avère particulièrement toxique et nuit à la santé comme à l'environnement. On y trouve des suies (ensemble de composés chimique résultant de la combustion incomplète de combustible; essence, gazole, kérosène), des résines, des métaux lourds (Al, Cr, Mo, Fe, Cu, Sn, Pb, Ar), des acides et d'autres composants chimiques. Déchet très toxique l'huile de vidange perturbe les procédés d'épuration biologique. En exemple, un litre d'huile usagée peut couvrir 1000 m³ d'eau et empêcher l'oxygénation de la flore et de la faune pendant des années.

I.6.10- Les imprimeries

On recense quatre imprimeries implantées au Tchad. Les encres d'imprimeries sont un mélange de pigments, d'huiles et d'additifs chimiques. Elles sont utilisées dans les procédés d'imprimerie comme la typographie, l'impression offset, la gravure, la flexographie et la sérigraphie, pour produire les livres, des formulaires, des catalogues, des emballages, des périodiques... Les encres d'imprimerie contiennent des composés organiques.

I.6.11- Le pétrole

Le transport du pétrole brut du Sud, à Doba, au port de Kribi (Cameroun) se fait par un oléoduc de plus de 1000 km au bout duquel des tankers chargent pour le marché occidental. Une raffinerie d'hydrocarbure pour la consommation locale est en construction à 40 km au nord de N'Djamena.

Eaux résiduaires : Elles contiennent généralement les produits chimiques dangereux, notamment des hydrocarbures, le phénol, l'azote ammoniacal entre autres. Les métaux lourds sont présents dans tous les types d'eau des raffineries. Nous pouvons citer entre autres les métaux lourds tels que Cd, Cr, Cu, (Hg), Pb, Ni, (Sn), Zn.

I.7- Caractérisation physicochimiques des effluents industriels

I.7.1- Généralité

Les eaux résiduaires industrielles sont les déchets liquides résultant selon les activités exercées, de l'exploitation ou la transformation des matières premières. La composition des eaux industrielles présente une extrême diversité selon le type d'industrie concernée (agroalimentaire, chimique, pétrochimique, textile...) et au sein d'une industrie donnée. Contrairement aux eaux usées domestiques, les caractéristiques des eaux résiduaires industrielles sont variables tant au point de vue de leur volume qu'à celui de leur composition. Le déversement des eaux usées industrielles constitue une source polluante constante, tandis que, le ruissellement de surface est un phénomène saisonnier [37]. D'importantes quantités d'eau et de solvants organiques tels que les hydrocarbures, les hydrocarbures halogénés, l'éther, les aldéhydes, les cétones, les alcalis organiques et les acides sont employés dans les transformations industrielles comme produits de base. De ce qui précède, il ressort qu'on peut trouver dans les eaux résiduaires, des impuretés organiques et inorganiques.

La composition des eaux résiduaires industrielles s'apprécie au travers des paramètres physicochimiques ou biologiques (principaux paramètres de caractérisation des eaux résiduaires): MES (matières en suspension), DBO (demande biochimique en oxygène), DCO (demande chimique en oxygène), Azote total global, Phosphate total, Turbidité, pH, température et la teneur en certains éléments chimiques dits métaux lourds (Cd, Pd, Ni, Hg, Cr(VI), Co, Cu, Zn...). Le présent travail porte sur l'étude physicochimique des eaux usées. Les méthodes utilisées sont celles homologuées par AFNOR ou citées par Rodier.

Tableau I.1. Classement des eaux de surface stagnantes et courantes d'après leur qualité. D'autres facteurs peuvent être pris en compte comme la concentration en NH_4^+ et les matières en suspension [1]

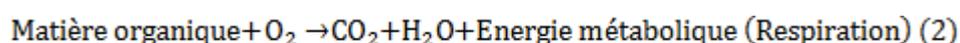
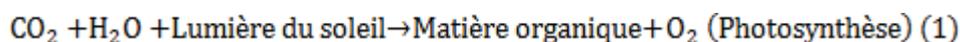
Classe de qualité	Taux de saturation	Oxygène dissous (mg/l)	DBO5 (mg/l)	DCO (mg/l)	Qualité de l'eau
1A	≥90	≥7	≤3	≤20	Excellent
1B	70...90	5...7	3...5	20...25	Bonne
2	50...70	3...5	5...10	25...40	Moyenne
3	<50	<3	10...25	40...80	Médiocre
4	-	-	>25	>80	Hors classe

I.7.2- L'oxygène dissous

L'oxygène dissous est la quantité d'oxygène présent en solution dans l'eau à une température donnée. La teneur en oxygène dissous est le paramètre le plus fondamental de la qualité de l'eau. Ainsi, la concentration de l'oxygène dans l'eau est contrôlée par plusieurs processus biologiques et chimiques, dont la photosynthèse et la respiration.

I.7.2.1- La photosynthèse et la respiration

Le processus de photosynthèse chez les plantes et les algues exploite le rayonnement solaire (énergie) pour convertir le dioxyde de carbone et l'eau en matière organique et en oxygène [14]. Les organismes vivants, plantes et animaux ainsi que les bactéries respirent en convertissant de la matière organique et l'oxygène en dioxyde de carbone, eau et énergie disponibles pour leur propre métabolisme. Les mécanismes de photosynthèse et de respiration peuvent s'illustrer de manière schématique comme suit:



L'oxygène dissous conserve ses propriétés oxydantes, soit par une réaction purement chimique sur le fer, soit par des phénomènes électrochimiques d'où son importance dans les phénomènes de corrosion. La teneur de l'oxygène dépasse rarement 10 mg/l. Cette teneur est fonction de l'origine de l'eau: elle est d'une quantité relativement importante dans les eaux de surface, proche de la saturation, par rapport aux eaux souterraines qui n'en contiennent que quelques milligrammes par litre.

I.7.2.2- Solubilité de l'oxygène

La solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue lorsque la température de l'eau augmente (à 30°C on tombe presque à la moitié de la valeur mesurée à 0°C), ce qui induit une diminution de la concentration en oxygène à saturation. Dans une eau chaude, la décomposition aérobie diminue fortement. Ceci est une cause importante de la pollution des eaux stagnantes en période de chaleur où les températures avoisinent les 50°C à l'ombre. Comme l'illustre le tableau ci-dessous, la solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la température.

Tableau I.2. Solubilité de l'oxygène dans l'eau en fonction de la température

Température (°C)	Solubilité (mg O₂/l)
0	14,16
5	12,37
10	10,92
15	9,76
20	8,84
25	8,11

La solubilité de l'oxygène varie également en fonction de la profondeur du fleuve, de l'heure de la journée, de la concentration de la matière organique et des nutriments ainsi que de la quantité de plantes aquatiques, d'algues et de bactéries présentes dans l'eau.

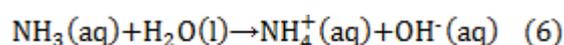
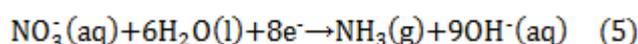
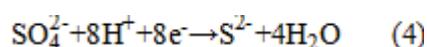
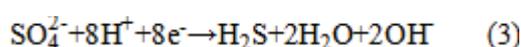
Par exemple, les recommandations canadiennes pour la qualité des eaux correspondant aux teneurs en oxygène dissous (TOD) les plus faibles qui soient acceptables sont de 6 et 5,5 mg/l pour le stade initial et les autres stades de vie, respectivement, dans les écosystèmes d'eau chaude, ainsi que de 9,5 et de 6,5 mg/l pour le stade initial et les autres stades de vie, respectivement, dans les écosystèmes d'eau froide [40].

Tableau I.3. *Recommandations pour la qualité des eaux établies pour l'oxygène dissous aux fins de la protection de la vie aquatique*

Ecosystème	Recommandation (mg/l)	
	Premiers stades biologiques	Autres stades biologiques
Eau chaude	6	5,5
Eau froide	9,5	6,5

La teneur en oxygène dissous de l'eau est déterminée en grande partie par l'équilibre qui s'établit entre l'apport d'oxygène et la consommation d'oxygène nécessaire à la métabolisation des matières oxydables reçues. Les rejets d'effluents organiques produits par l'activité humaine tendent à faire pencher la balance du côté de la consommation [40].

Dans les eaux profondes et les eaux dormantes, la faible quantité d'oxygène diminue la décomposition aérobie, de telle sorte qu'elle est remplacée par une fermentation anaérobie conduisant à la formation de certains gaz tels que H₂S et CH₄. La production de mauvaises odeurs dans les eaux usées s'explique dans la plupart des cas par le manque d'oxygène à cause d'une forte pollution organique. Dans les périodes de sécheresse, ou lors d'une stagnation prolongée des eaux usées dans les canalisations, la production de mauvaise odeur peut devenir particulièrement forte. Les bactéries réduisent les sulfate et nitrate et utilisent leur oxygène pour décomposer les polluants présents dans les eaux usées. Il se forme alors des hydrogènesulfures ou des sulfures et des ions ammonium :



S²⁻ et NH₄⁺ confèrent à l'eau une odeur caractéristique dite « putride », la manifestation de cette odeur atteste donc de la présence de micro-organismes dans l'eau et par suite une pollution organique.

Une diminution de l'oxygène dissous peut avoir plusieurs impacts négatifs sur l'écosystème des lacs dont les principaux sont:

1. une mortalité accrue de plusieurs organismes vivants.
2. La libération du phosphore contenu dans les sédiments. En milieu réducteur, le phosphore emprisonné dans les sédiments peut être libéré via des processus chimiques complexes. Le phosphore devient alors disponible pour les végétaux aquatiques qui l'utilisent pour proliférer, ce qui entraîne une augmentation de la matière organique à décomposer.

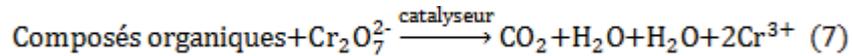
I.7.2.3- Vie dulcicole

La plupart des animaux et des organismes vivant dans l'eau ne peuvent pas vivre sans la présence d'oxygène dissous. Ils ont besoin d'une certaine concentration minimale en O₂; plus élevée pour les poissons, la plus basse pour les bactéries. A une teneur inférieure à 4 mg/l d'oxygène (valeur critique pour les poissons), certaines espèces de poissons peuvent être perturbées. Les concentrations réduites d'oxygène entraînent des effets létaux et sublétaux (physiologique et comportementaux) chez divers organismes, en particulier chez les poissons. Les jeunes poissons tendent à être plus sensibles que les poissons plus âgés [41]. L'exposition à de faibles teneurs en oxygène au cours du développement embryonnaire peut donner lieu à des malformations [42]. L'exposition d'embryons de saumon kéta à une TOD de 0,3 mg/l a entraîné un raccourcissement de la colonne vertébrale et la production d'alevins anormaux [43]. Une concentration de 1 mg/l a provoqué chez les larves de l'achigan à grande bouche un blocage irréversible de la mâchoire inférieure empêchant le poisson de remonter à la surface et de se nourrir [44]. L'exposition d'œufs de truite arc-en-ciel à une TOD de 2,6 mg/l a occasionné d'importantes anomalies de développement comme les difformités de la queue et des épines ainsi que des anomalies du système nerveux et du développement cérébral [45]. A des concentrations de 1 à 2 mg/l, un nombre élevé d'alevins de cisco présentaient une tête difforme, des mâchoires inarticulées et des yeux de forme irrégulière [46]. Ainsi, la mort ou la perte d'équilibre se produisent généralement entre des concentrations de 1 et de 3 mg/l.

I.7.3- Demande chimique en oxygène (DCO)

C'est l'un des paramètres globaux (DCO, DBO, AOX, COT), qui donne une indication sur les quantités de substances chimiquement oxydables présentes dans l'eau. La DCO est une méthode qui permet de mesurer la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation chimique des minéraux réduits et des matières organiques d'un échantillon. Comme oxydant on se sert essentiellement du dichromate de potassium K₂Cr₂O₇, dans une solution d'acide sulfurique

porté à ébullition à reflux pendant 2 heures en présence d'ions Ag^+ comme catalyseur. Dans de telles conditions, 95 à 97 % de composés organiques et les minéraux sont oxydés. D'une manière simplifiée, la réaction s'écrit:



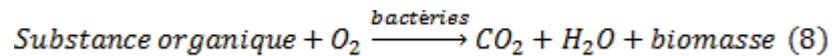
A partir de la quantité de dichromate utilisé, on calcule la quantité équivalente en oxygène – la valeur de la DCO qui, en théorie, aurait réalisé la même oxydation.

La valeur de la DCO est une indication importante, avec laquelle on peut caractériser la pollution globale d'une eau ou de l'eau usée. C'est un des paramètres d'évaluation utilisé pour estimer les taxes de pollution que doivent payer les entreprises.

1.7.4- Demande biochimique en oxygène (DBO)

La demande biochimique en oxygène DBO est la quantité d'oxygène (mg/l ou g/l) que des bactéries utilisent pour décomposer partiellement ou pour oxyder totalement en CO_2 des substances organiques dans l'eau, en un temps donné, à l'aide de leur système enzymatique. La DBO est une méthode normalisée d'incubation microbienne qui permet de mesurer la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation des matières organiques et certaines matières inorganique au cours d'une période donnée. Pour une eau superficielle, ce paramètre traduit la consommation d'oxygène relative au phénomène d'auto épuration. La DBO_5 est la quantité d'oxygène (mg/l ou g/l) que les bactéries et autres microorganismes utilisent pendant 5 jours pour décomposer dans un échantillon donné les substances polluantes qui sont biochimiquement oxydables comme les graisses, les hydrates de carbonés ou les tensioactifs. Un cours d'eau modérément pollué a une DBO_5 de 6 mg/l. Cela signifie que les bactéries et microorganismes utiliseront 6 milligrammes d'oxygène dissous en 5 jours pour décomposer les substances biodégradables contenues dans un litre d'eau. En ce qui concerne les eaux domestiques, dans la plupart des cas, environ 70 % des composés organiques sont dégradés après 5 jours. La dégradation des composés glucidiques, lipidiques et protéiques des matières organiques se traduit, dans un premier temps, par une décomposition des chaînes carbonées. Celle-ci commence immédiatement et dure environ 20 jours à la température de 20°C ; par contre le début de la transformation des matières azotées n'apparaît qu'après une dizaine de jours et demande beaucoup plus de temps. Dans ces conditions, il a été conventionnellement retenu d'exprimer la DBO_5 en mg d'oxygène consommé pendant 5 jours à 20°C . Ainsi la

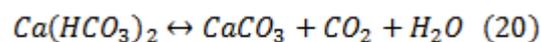
valeur obtenue après 5 jours de test suffit pour la caractérisation de la DBO. D'une manière simplifiée, on décrit ceci par:



Les microorganismes transforment de la matière par leur métabolisme, pour gagner de l'énergie (catabolisme), et pour fabriquer des substances nécessaires à la composition des cellules (anabolisme). De cette manière, les organismes forment des produits de décomposition, mais font réagir en même temps une petite partie des substances organiques pour former leur propre masse cellulaire, la biomasse. Tous les polluants ne sont pas totalement décomposables. C'est pourquoi la valeur de la DBO se situe en-dessous de celle de la DCO [1]. Enfin, il faut préciser que dans un milieu pollué de faibles valeurs de DBO5 peuvent être liées à la présence d'éléments toxiques inhibiteurs qui peuvent ralentir la dégradation ou rendre les bactéries inactives.

I.7.5- Le pH

Le pH représente la concentration des ions hydrogènes dans une solution. Le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés. La mesure est importante, car le pH régit un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. Le pH des eaux naturelles varie normalement en fonction du système bicarbonates-carbonates :



En général, une augmentation du pH entraîne la précipitation des cations métalliques sous formes d'hydroxydes ou d'oxydes métalliques insolubles. Le pH joue aussi un rôle essentiel dans l'adsorption des métaux sur la matière organique. Le pH est un facteur important dans le système biologique, chimique et de l'environnement aquatique.

I.7.6- La conductivité

La conductivité est la mesure de la capacité d'une eau à conduire un courant électrique. Elle est reliée à la concentration et à la nature des substances dissoutes. La conductivité varie en fonction de la présence d'ions, de leur concentration, de leur mobilité et de la température de l'échantillon. En général, les sels minéraux sont de bons conducteurs par opposition à la matière organique et colloïdale, qui conduit peu. Par conséquent, dans le cas des eaux usées fortement chargées en matière organique, la conductivité ne donnera pas forcément une idée

immédiate de la charge du milieu. Dans les autres cas, elle permet d'évaluer rapidement le degré de minéralisation d'une eau. La mesure de la conductivité s'effectue à l'aide d'un conductimètre.

I.7.7- La turbidité

La turbidité définit l'aspect plus ou moins trouble de l'eau. Elle est en rapport direct avec les matières en suspension, lesquelles provoquent la diffusion de la lumière par effet Tyndall. Ainsi la turbidité est d'autant plus élevée que la densité des particules contenues dans l'échantillon d'eau est forte. La mesure de la turbidité s'effectue à l'aide d'un turbidimètre dont le principe est assez voisin de celui du photomètre.

I.7.8- La température

La température est l'un des facteurs qui contrôlent l'essentiel des activités biologiques et écologiques des êtres vivants. La température de l'eau est un élément essentiel dans le fonctionnement des systèmes aquifères [47].

I.7.9- Les métaux lourds

La présence des métaux à des teneurs décelables dans l'environnement ne signifie pas nécessairement qu'il y a pollution. Au cours de leur transport, ces éléments subissent des interactions diverses, notamment avec des espèces organiques ou minérales, en suspension ou dissoutes avec lesquels ils peuvent former des complexes. De ces interactions dépend fortement leur devenir dans l'environnement [48]. Les concentrations des métaux dans les sédiments sont généralement très supérieures aux concentrations observées dans la colonne d'eau [49]. Ainsi donc, les niveaux des métaux dans les colonnes d'eau peuvent respecter les lignes directrices de la qualité de l'eau de consommation et de la santé écologique, mais les sédiments non [50].

I.7.9.1- Source naturelle

Les métaux sont des éléments naturels, présents dans tous les compartiments de notre environnement, l'air, l'eau, les sols. Les métaux sont des éléments lourds, concentrés dans le magma granitique [51]. La présence des métaux dans l'environnement est causée par l'action des agents atmosphériques sur les roches et les sédiments, le lessivage des sols et les rejets industriels. Les métaux lourds sont des métaux ayant une densité supérieure à 5 g/cm³.

Depuis la formation de la Terre, les métaux lourds ainsi que d'autres substances suivent un cycle géochimique qui a conduit à leur distribution hétérogène à la surface du globe [52]. L'action mécanique de l'érosion et l'attaque des acides formés dans l'atmosphère ou issus de la décomposition de la matière organique sont les principales causes de l'altération et de la désagrégation des roches. Les métaux fixés dans les roches sous formes d'oxydes ou de silicates sont peu altérables chimiquement tandis que les métaux présents dans les roches sous forme de sulfures et de carbonates sont au contraire attaqués chimiquement et se dissolvent facilement dans l'eau [53]. Le transport en aval des débris rocheux, des matières en suspension, et des divers sels mis en solution sont fonction du débit de l'eau et de la taille des particules. Un métal peut être, selon sa concentration, essentiel ou dangereux pour l'humain ou pour l'environnement. Certains métaux lourds figurent parmi les contaminants les plus dangereux aussi bien pour la faune et la flore aquatique que pour les sols. Ces métaux ne sont pas nécessaires à la vie ; ils perturbent souvent le cours normal des processus métaboliques, même à l'état de trace [54].

Tableau I.4. Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité.

T: toxique, E: essentiel

Métal	Plantes	Animaux	Densité (g/cm ³)
Hg	T	T	13,56
Pb	T	T	11,34
Cu	E T	E T	8,92
Ni	T	E	8,9
Cd	T	T	8,65
Fe	E	E	7,86
Cr		E	7,2
Mn	E T	E	7,2
Zn	E T	E	7,14

I.7.9.2- Sources anthropiques

Les principales sources anthropiques des métaux lourds et de certains polluants organiques sont les effluents industriels. Dans les pays du nord, la révolution industrielle a eu un impact sur la qualité des cours d'eau et notamment sur leur concentration en métaux. Les problèmes associés à la contamination par les métaux lourds ont été tout d'abord mis en évidence dans les pays industriellement avancés en raison de leurs déversements industriels plus importants. Cette pollution a occasionnée des accidents suite à la contamination par le mercure, le

cadmium... notamment en Suède et au Japon. En Afrique, sous l'effet de la rapide croissance démographique, l'urbanisation accrue et l'expansion des activités industrielles, les eaux de surface sont devenues le réceptacle de quantité des matières organiques et inorganiques excédant leur capacité naturelle de purification, alors que, dans le passé, la purification et la dilution naturelle suffisaient généralement. L'entrée des métaux lourds dans les eaux de surface est le résultat soit de déversements directs des eaux usées industrielles, soit d'un lessivage des décharges sèches et humides ainsi que les surfaces agricoles. En Afrique, il n'y a pas de cohérence dans l'étude des contaminants. En général, les données disponibles proviennent de recherches isolées conduites individuellement, et très rares sont les études systématiques qui ont pour objet les eaux africaines.

Tableau I.5 Quelques exemples de sources industrielles et agricoles d'où peuvent provenir les 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, 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 cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

I.8- Répartition et devenir des métaux lourds dans l'environnement

aquatique

Une fois dans l'environnement aquatique, les métaux se répartissent entre les différents compartiments aquatiques (l'eau, les solides en suspension et les sédiments). Dans les milieux aqueux, les métaux lourds sont présents sous forme de complexes, de particules ou en solution, et cela va déterminer leur comportement et leur toxicité dans le milieu aquatique [55]. Les sédiments sont des intégrateurs des métaux ; ils permettent de fournir une image plus précise de l'étendu de contamination métallique dans le milieu aquatique [49].

Les substances chimiques inorganiques (anions majeurs tels que les carbonates, chlorures et hydroxydes) et organiques présentes dans l'eau constituent des ligands susceptibles de complexer les ions métalliques. La forme chimique sous laquelle se trouvent des métaux affecte leur biodisponibilité et leur capacité de transfert vers les écosystèmes. Ainsi par exemple, les métaux dissous sont plus facilement assimilés par les plantes et les organismes que les métaux sous forme cristalline [56]. La figure 1.9 schématise le phénomène de complexation des métaux dans l'eau.

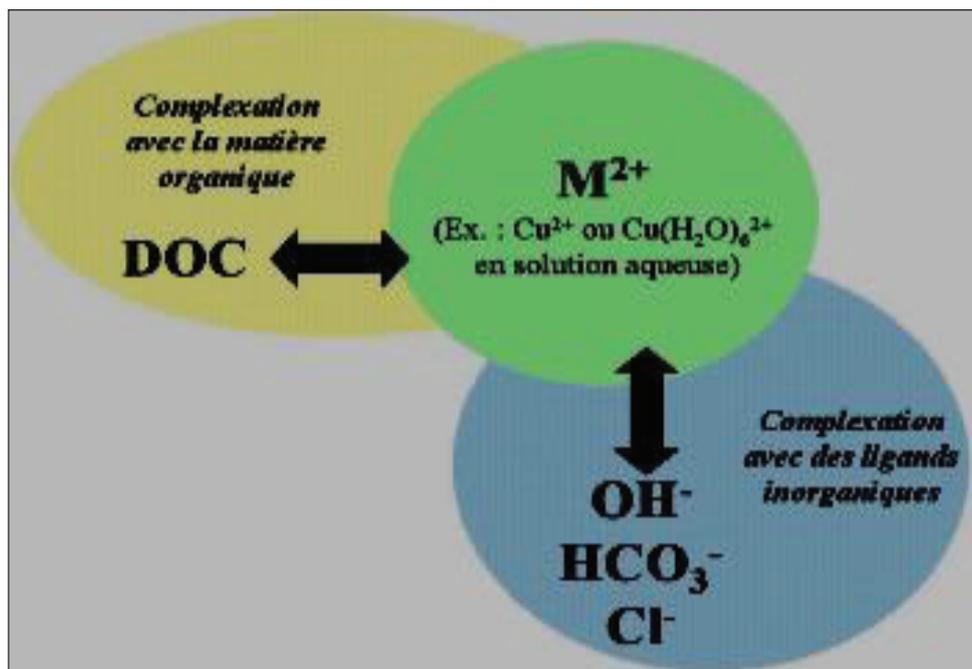


Figure 1.9 Phénomène de complexation des métaux dans l'eau (INERIS)

Dans le milieu aqueux, les principaux processus de distribution et de répartition des métaux lourds sont gouvernés par des mécanismes physicochimiques complexes tels que la dilution, la dispersion, la sédimentation et l'adsorption/désorption. Le comportement et le devenir des métaux lourds, la distribution, la complexation avec des ligands (organiques et minéraux), l'interaction et même la distance jusqu'à laquelle ils sont transportés dépendent de leurs propriétés physiques (solubilité, adsorption...), leur stabilité chimique ainsi que les caractéristiques physicochimiques de l'eau (pH, potentiel redox, lumière, température...) [57] [58]. Le ruissellement peut également être responsable de la dissolution et de la mise en suspension de cristaux précipités, du transport de la forme dissoute, du métal adsorbé sur les particules de sol érodées ainsi que de leur désorption [59].

I.9- L'adsorption des métaux par des sédiments

L'adsorption est définie comme la fixation des molécules de soluté à la surface d'un solide. Le processus d'adsorption conduit à l'obtention d'un état d'équilibre auquel correspond une concentration bien définie de soluté [60].

- **Adsorption physique**

Appelée également physisorption, elle est caractérisée par une faible énergie de liaison inférieure à 6 Kcal/mol. Dans l'adsorption physique, le temps de rétention de la substance adsorbée est court et la surface adsorbée peut être recouverte de multiples couches moléculaires de produits adsorbés [60].

- **Adsorption chimique**

Appelé également chimisorption, elle met en jeu une énergie élevée, supérieure à 10 Kcal/mol et correspond aux liaisons covalentes entre l'adsorbant et la molécule adsorbée [60]. Dans l'adsorption chimique, le temps de rétention est long et seule la première couche liée à la surface adsorbante est chimiquement adsorbée, les autres couches, dans le cas où elles existent, sont retenues par la physisorption.

Une partie importante des micropolluants rejetés dans les eaux se trouve liée au sédiment ou à la matière en suspension (MES) [61]. C'est le cas de beaucoup de métaux et des produits organochlorés. Parmi les éléments les plus toxiques, seul l'arsenic est relativement soluble: 25 % en solution en moyenne dans les fleuves non pollués contre 2,5 % pour le cadmium, 0,5 % pour le plomb, 0,25 % pour le chrome et 0,05 % seulement pour le mercure [19]. Les sédiments sont d'excellents indicateurs de l'état d'eau grâce à leur pouvoir accumulateur [63].

La distribution des métaux lourds dans la phase solide et leur transfert dans l'eau font intervenir, comme nous l'avons déjà mentionné, plusieurs types de phénomènes de surface: précipitation (sous formes oxydées, réduites), coprécipitation et adsorption sur des composés minéraux et organiques (figure 1.10) [64]. Les résultats des expériences d'adsorption, réalisées par Serpaud et al [63], effectuées à différentes valeurs de pH, montrent que dans le cas de Cu, Cd et Zn, il y a une augmentation systématique du taux d'adsorption avec l'augmentation du pH (Cu: 70/90 %; Cd: 75/90 %; Zn: 75/95 %). Dans le cas du plomb, l'évolution est peu significative. D'autres expériences réalisées en absence de sédiment avec une solution de 1 mg/l de chaque métal relève qu'une précipitation chimique partielle n'apparaît qu'à partir de

pH = 9. Weber en 1972 [64] a étudié l'adsorption des métaux par des sédiments en fonction de la température entre 10 et 30°C, et a trouvé que l'effet de la température n'est pas très significatif. Les proportions d'éléments en solution et en suspension sont relativement constantes quelle que soit la teneur dissoute de départ.

La maîtrise des phénomènes d'adsorption pourra contribuer au développement des techniques permettant de piéger les polluants des eaux résiduaires en réduisant leur concentration. Badmus et *al*, [65] ont ainsi pu réduire dans les effluents industriels les concentrations de plomb, de zinc et de cuivre de manière très significative (supérieur à 80%) en utilisant le peroxyde d'hydrogène. Selon ces auteurs et bien d'autres, les métaux lourds constituent une menace pour la santé publique et peuvent altérer la qualité esthétique de l'eau. A cet égard, les échangeurs d'ions peuvent être utilisés dans le traitement des eaux industrielles contenant les métaux lourds [66].

I.10- Paramètres influant sur la mobilité des métaux dans l'eau

La mobilité des métaux dans les eaux traduit le plus souvent par le passage de la forme colloïdale et particulaire à la forme dissoute et inversement. Le pH, la dureté, la teneur en carbone organique, le potentiel redox, la salinité sont de paramètres physicochimiques qui influencent ce type de transformations dans l'eau [67].

Le pH dépend principalement de l'activité biologique et de la capacité tampon du système. Les processus d'échange des métaux lourds à l'interface eau-sédiments, sont fonction d'un certain nombre de paramètres de l'eau tels que la température, le pH et la force ionique. Ainsi, une augmentation du pH favorise l'adsorption métallique sur la fraction réductible des sédiments (oxyde fer et de manganèse). Par contre, la concentration des métaux sous forme ionique diminue. La formation des sulfures, la biodégradation des matières organiques, toutes deux fonctions de l'acidité du milieu, permettent d'interpréter la spéciation des métaux dans les sédiments et leur biodisponibilité [68].

La matière organique joue un rôle très important vis à vis de la mobilité et de la biodisponibilité des métaux. Les métaux ont une forte affinité pour la matière organique. La présence de cette dernière, engendre des réactions de complexation. Les concentrations en métaux sous leurs formes les plus toxiques (cations) diminuent conduisant ainsi une diminution de leur biodisponibilité [69].

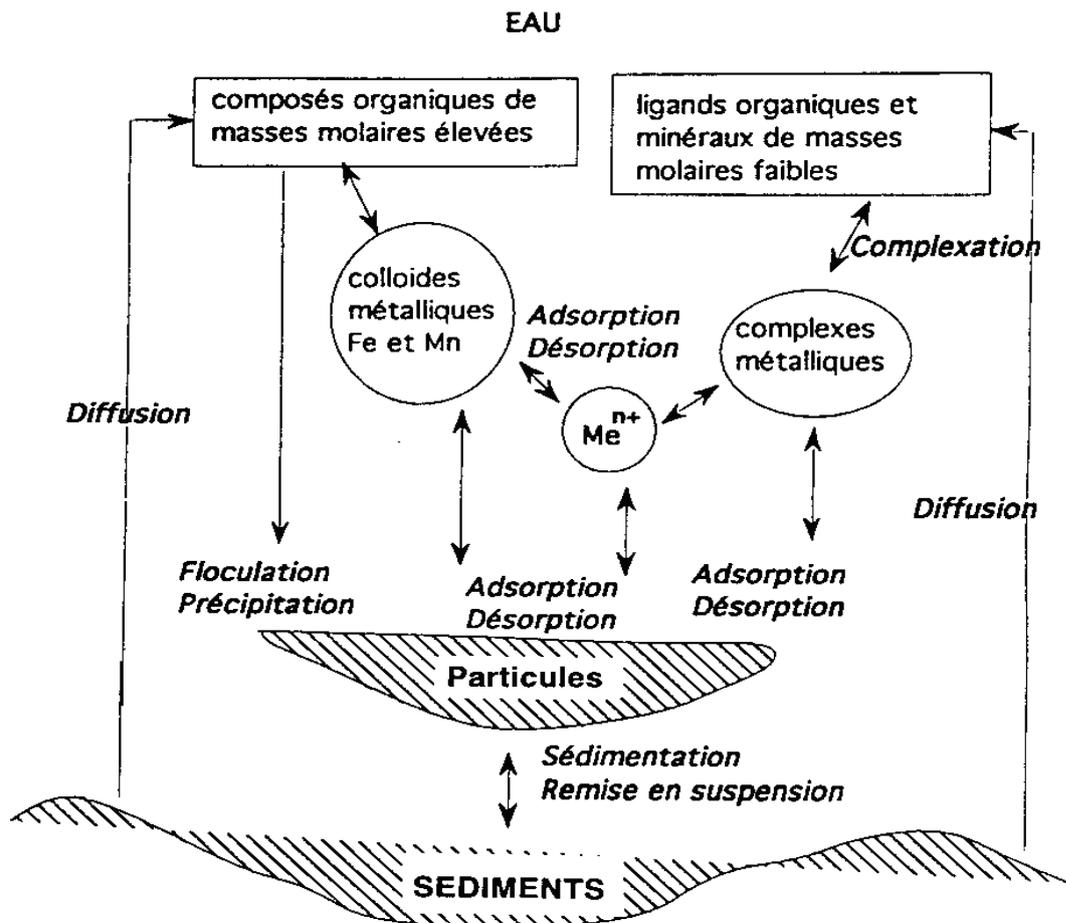


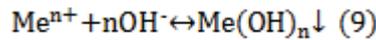
Figure 1.10. Représentation schématique d'un système d'échange eau-sédiment (B.Serpaud et al.,)

L'adsorption pourrait être la première étape du processus d'élimination des métaux de l'eau. La majeure partie des métaux rejetés dans l'eau se trouve sous forme particulaire et tend à se déposer, à précipiter ou à s'adsorber sur la matière organique, les argiles et sur les oxydes et hydroxydes. L'adsorption dépend beaucoup de la surface exposée et de la granulométrie du sédiment. Plus les particules sédimentaires sont petites et plus la surface de contact avec le milieu est importante [70]. Le stockage temporaire ou permanent des métaux se fait dans les sédiments et dans l'eau. Les métaux dissous peuvent précipiter en cas de changements de pH ou de condition redox.

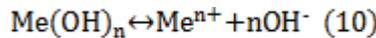
I.11- Précipitation d'hydroxyde

La plupart des métaux forment des hydroxydes peu solubles ou précipités en solution aqueuse.

La connaissance de la valeur du pH est essentielle pour savoir si les métaux dans l'eau sont sous forme de cation ou d'hydroxydes. La précipitation est décrite par l'équilibre:



Habituellement on donne la constante d'équilibre pour la réaction inverse:



On définit le produit de solubilité K_s , qui est une grandeur spécifique, par l'équation:

$$K_s = [\text{Me}^{n+}] \cdot [\text{OH}^-]^n \quad (11)$$

Le produit ionique de l'eau est:

$$K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14} \quad (12)$$

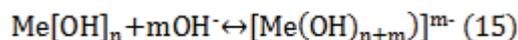
On obtient

$$K_s = [\text{Me}^{n+}] \cdot [K_e / [\text{H}_3\text{O}^+]]^n \quad (13)$$

Ou

$$\log[\text{Me}^{n+}] = npK_e - npH - pK_s \quad (14)$$

Ainsi, nous pouvons calculer la solubilité des ions métalliques dans l'eau à un pH donné. Pour ces métaux (Pb, Cd, Cr, Fe), l'hydroxyde formé n'est pratiquement plus dissous dans un excès d'ions OH^- , mais pour certains il peut se former des complexes hydroxo qui, au-delà du pH optimum, se dissolvent à nouveau. On dit de tels métaux qu'ils sont amphotères.



Pour de tels processus, à savoir la dissolution d'un précipité difficilement soluble avec formation de complexe, la constante d'équilibre est donnée par

$$K_c = [\text{Me}(\text{OH})_{n+m}]^{m-} / [\text{OH}^-]^{m-} \quad (16)$$

Pour la concentration du métal dissous, on obtient:

$$[\text{Me}(\text{OH})_{n+m}]^{m-} = K_c \cdot [\text{OH}^-]^{m-} \quad (17)$$

Ainsi,

$$\log^{m-} [\text{Me}(\text{OH})_{n+m}]^{m-} = -mpK_e + mpH - pK_c \quad (18)$$

En fonction du pH, les ions Me^{n+} et $[\text{Me}(\text{OH})_{n+m}]^{m-}$, pour des métaux amphotères, sont présents dans des conditions différentes: la somme de ces deux concentrations indique la quantité de métal dissoute dans l'eau.

I.12- Effets des métaux

Certains métaux lourds, dits oligoéléments ou éléments essentiels, sont indispensables à la croissance et au bien-être des organismes vivants, y compris l'homme (fer, cuivre, chrome, zinc, Mn...) mais en faibles quantité; ils permettent le fonctionnement de certains métabolismes aussi bien chez le végétal, les animaux que chez les hommes. En quantité insuffisante, ils peuvent entraîner des maladies alors que leur trop forte concentration peut engendrer des effets indésirables, voire toxiques [71]. Ils ont donc un comportement variable. Le nickel, par exemple, constitue un polluant pour les plantes, par contre il est essentiel à l'état de traces pour la vie de certains animaux. D'autres éléments, comme Pb, Hg, et Cd ne sont pas indispensables aux activités métaboliques, mais par contre ils sont essentiellement toxiques; ils ont la propriété de s'ingérer et de s'accumuler dans la chaîne alimentaire, et ainsi de devenir toxique dès que leurs concentrations dans les organismes vivants dépassent un seuil donné. A titre d'exemple, chez l'homme, le plomb inhibe la synthèse de la vitamine D dès une concentration de 100 µg/l dans le sang [72]. La toxicité des métaux résulte en grande partie de leur affinité pour les groupements -SH des enzymes qu'ils inactivent après s'y être liés [73]. Les trois métaux (Pb, Hg, et Cd) se distinguent des autres métaux par quelques caractéristiques physico-chimiques communes:

- transportables, changent de forme chimique mais ne se détruisent pas;
- conductivité électrique élevée, qui explique leur utilisation dans de nombreuses industries;
- présentent une certaine toxicité pour tous les organismes (microorganismes, plantes, animaux, homme). Ils n'ont aucune activité biologique et peuvent entraîner notamment des lésions neurologiques plus ou moins graves;
- ils ont une particularité à s'accumuler dans la chaîne alimentaire.

La contamination de l'environnement aquatique par des métaux, peut avoir des effets toxiques aigus ou chroniques, sur la vie aquatique. La plupart des données, publiées jusqu'ici concernant les effets des métaux sur les organismes aquatiques, indiquent cependant que ces effets nocifs se produisent à des concentrations supérieures à celles que l'on trouve généralement dans l'environnement.

Une grande quantité de substances polluantes entrent dans les systèmes aquatiques. Les analyses chimiques peuvent qualifier et quantifier une substance, mais elles ne peuvent rien

dire sur les effets biologiques de celle-ci : ce qui vaut pour une substance, peut être différent quand il s'agit d'un mélange complexe [74]

Plusieurs techniques sont utilisées pour évaluer les quantités des métaux lourds ou autres polluants dans l'eau. L'approche conventionnelle de contrôle des substances chimiques nocives dans l'environnement aquatique consiste à considérer un ensemble de paramètres physicochimiques et biochimiques car la procédure chimique seule ne peut pas fournir des informations complètes. Plusieurs pays utilisent les tests de toxicité dans le cadre de leur programme de surveillance de la qualité des eaux [75].

En prenant comme critère de toxicité la concentration admise dans une eau potable, il apparaît que le mercure et le cadmium sont considérés comme 1000 fois plus toxiques que d'autres métaux de transition, comme le cuivre ou le zinc. D'autres métaux sont plutôt générateurs de goût (Na, K, Mg) ou de couleurs (hydroxydes de fer ou de manganèse) [76]. En plus de leur grande toxicité, certains de ces métaux sont susceptibles de s'accumuler fortement dans les organismes vivants, et de ce fait, se retrouver dans la chaîne alimentaire: on parle alors de la bioaccumulation. Au bout de ces chaînes, les métaux peuvent atteindre des concentrations qui sont supérieures de plusieurs puissances de 10 à celle trouvées dans l'eau. Ceci est dû aux grandes quantités de métaux qui parviennent journallement dans l'organisme et au temps de demi-vie biologique élevés [76].

Le mercure

Le mercure est un métal liquide à température ambiante, d'aspect argenté, inodore aux propriétés remarquables (alliage avec d'autres métaux, amalgames). Il se divise par agitation en fines gouttelettes. C'est aussi le seul métal dont la température d'ébullition soit inférieure à 650°C. Le cycle global du mercure est compliqué en raison de la volatilité du mercure élémentaire (Hg^0). Le mercure se combine très facilement avec d'autres substances inorganiques ou organiques.

La présence naturelle du mercure dans les eaux douces superficielles est de l'ordre de 0,1 à 2 $\mu g/l$. Cependant, à proximité des complexes industriels et des lieux d'exposition des minerais, sa teneur peut atteindre 80 $\mu g/l$. Sa basse concentration détectée très souvent dans l'eau n'exprime pas la situation réelle du système car ce métal se déplace vers les sédiments [77, 78]. En présence d'oxygène, le mercure s'oxyde très facilement passant de l'état métallique

(Hg°), liquide ou gazeux à l'état ionisé (Hg^{2+}). Le mercure inorganique existe sous trois états d'oxydation. Sous sa forme élémentaire, le mercure est un liquide dense, argenté dans des conditions normales de température et de pression. Lorsqu'il est sous forme de vapeur, le mercure élémentaire peut parcourir de grandes distances alors que, sous d'autres formes, il peut se lier à des particules plus lourdes et se déposer sur place [79].

Le mercure se combine bien aux hydrocarbures pour donner le mercure organique. Les composés de mercure organique les plus connus sont le méthylmercure et le diméthylmercure. La méthylation se déroule principalement en milieu aqueux ou dans les intestins, en fonction de l'acidité et de la présence du soufre. Il existe des échanges permanents entre ces différentes formes, car le mercure est très réactionnel.

Les sels les plus connus sont le chlorure de mercure HgCl_2 , un composé corrosif très toxique, le chlorure mercurieux Hg_2Cl_2 , occasionnellement encore utilisé en médecine, $\text{Hg}(\text{NO}_3)$, comme détonateur utilisé dans les explosifs, et le sulfate, de couleur rouge, utilisé comme pigment dans les cendres [80].

Le mercure a une histoire durant le dernier siècle avec des événements aux lourdes conséquences sanitaires et écologiques: les rejets industriels à base de sels mercuriques dans une baie fermée à Minamata au Japon, les eaux du bassin de l'Amazonie (Brésil, Bolivie, Guyane...) polluée par le mercure apporté entre autre par les chercheurs d'or, des tonnes de mercure rejetées par les cabinets dentaires dans les éviers en France [81], etc. Le mercure est un métal très réactif au milieu dans lequel il se trouve (température, composition chimique...). Il peut se lier dans l'organisme aux molécules constituant la cellule vivante (acide nucléique, protéines...) modifiant leur structure ou inhibant leurs activités biologiques. Son comportement dans des systèmes biologiques se distingue de la majorité des autres métaux lourds car il présente des taux rapides d'accumulation et des taux bas d'excrétion vers l'organisme avec pour résultat un processus d'accumulation [82].

Le mercure élémentaire a pour cible principale le cerveau et les tubules rénaux. Les ions mercuriques attaquent surtout le rein (néphrite) mais aussi le système nerveux, la peau et les systèmes de défense immunitaire. Les composés organiques méthylmercuriques traversent la barrière placentaire et gagnent facilement l'embryon, pouvant ainsi produire des malformations congénitales. L'OMS estime qu'à partir de 40 microgrammes de mercure dans l'urine, le risque d'intoxication est importante et peut entraîner toute une série de symptômes

de nature variée: neurologiques, gastro-intestinaux, rénaux, dermatologiques, cardiovasculaire, endocriniens, immunitaires...

Pour l'eau destinée à la consommation humaine, l'OMS et la réglementation française indiquent comme valeur limite $1\mu\text{g/l}$.

a- Le plomb

Le plomb est présent dans la croûte terrestre et dans tous les compartiments de la biosphère. Le plomb est présent dans divers minéraux dont les plus importants sont la galène (PbS), la cérusite (PbCO_3) et l'anglésite (PbSO_4). Il existe sous les états d'oxydation 0, +II, +IV, mais dans l'environnement il est principalement sous l'état +II. Le degré +II est stable dans pratiquement toutes les conditions environnementales. Les batteries électriques représentent une fraction importante des utilisations du plomb. Le plomb est utilisé dans la fabrication des radiateurs d'automobiles, des produits chimiques, des munitions, des alliages, des enrobages de câbles, des céramiques, des réservoirs etc. L'acétate de plomb est utilisé dans la teinture du coton, dans les peintures et dans l'industrie cosmétique. Le carbonate de plomb entre dans la fabrication de ciments, mastics et céramiques. Les usages les mieux connus du plomb sont la tuyauterie domestique (réseaux d'approvisionnement en eau), ainsi que son ajout à l'essence comme agent antidétonant.

Le plomb peut être dans l'eau de boisson à des concentrations significatives. La plupart des composés de plomb (II) sont peu solubles dans l'eau (par exemple PbS , PbCO_3 , PbSO_4 , les composés halogénés du plomb), par contre les acétates de plomb étant sont plus solubles. Dans le milieu aquatique, la majeure partie du plomb véhiculé se trouve dans des sédiments. Le comportement du plomb dans la phase liquide dépend du pH et de la température du milieu. Ainsi des pH inférieurs à 7,5 favorisent la dissolution du plomb. Dans les eaux douces le plomb sous forme dissoute forme des complexes avec des ligands tels que HCO_3 , CO_3 , OH , $(\text{OH})_2$. L'eau de robinet peut, dans certaines régions, constituer un apport important en plomb.

Même en petite quantité le plomb peut être nocif. L'intoxication à long terme au plomb provoque le saturnisme dont la manifestation aiguë est la classique colique de plomb, engendrant une crise abdominale très douloureuse. Une exposition de courte durée à des concentrations élevées peut provoquer des vomissements, des diarrhées, des convulsions, le coma ou même la mort. Le plomb agit préférentiellement sur le système nerveux, le rein et la moelle osseuse, mais aussi sur les systèmes endocriniens et reproducteurs.

Les ions de plomb, vu leur affinité comparativement élevée pour les protéines, détruisent l'hémoglobine et la protéine plasmatique du sang. Cela conduit à une inhibition de la synthèse des globules rouges sanguins. Le plomb peut s'infiltrer dans la moelle, le foie et les reins [83]. L'action neurotoxique du plomb se traduit par une encéphalopathie convulsivante (maux de tête violents, hallucinations, crise convulsives...) pouvant aboutir à un coma mortel. En cas d'intoxication sévère, on peut observer des troubles neurocomportementaux, une détérioration intellectuelle, une anémie et une atteinte vasculaire caractérisée par une hypertension artérielle. Le plomb est toxique pour les testicules, ce qui conduit à une diminution du taux de spermatozoïdes. Chez la femme gestante, le plomb peut traverser facilement la barrière placentaire et s'accumule dans les os du fœtus. Des études récentes chez les rats ont mis en évidence une activité cancérogène du plomb, en particulier au niveau des reins [81].

La vie aquatique peut être perturbée à partir de 0,1 mg/l; des effets toxiques peuvent se manifester sur le poisson à partir de 1 mg/l. Toutefois l'action toxique est variable selon les espèces et le degré de contamination de l'eau. Les normes OMS et Conseil des Communauté européenne ont été abaissées de 50 µ/l à 10 µ/l.

b- Le cadmium

Le cadmium est un élément relativement rare et n'existe pas tel quel à l'état naturel. Il est présent dans la croûte terrestre à des concentrations d'environ 1 à 2 ppm, où il est souvent associé au zinc et au plomb [84]. Le cadmium intervient, souvent de façon diffuse et à de faibles quantités dans un grand nombre de procédés et de produits industriels et d'activités humaines. Les engrais phosphatés employés introduisent du cadmium dans les sols. Le cycle de l'eau et le labourage conduisent ensuite à la libération de ce polluant. Les boues de station d'épuration, les lixiviats de décharge contiennent du cadmium et leur épandage contribue à l'enrichissement des sols et des eaux en ce métal. Un grand nombre de produits (peinture, vernis, matériaux de construction, réactifs de laboratoire, électronique, pigments et stabilisants, accumulateurs et piles...) peuvent contenir du cadmium en faible quantité [84].

Le cadmium dans l'environnement n'est presque jamais trouvé à l'état métallique mais dans son état d'oxydation unique +II; En milieu aqueux, le cadmium est relativement mobile et peut être transporté sous forme de cations hydratés ou de complexes organiques ou inorganiques [84]. D'une façon générale, les eaux superficielles ne contiennent que quelques microgrammes de cadmium par litre. Lorsque les teneurs plus élevées sont rencontrées dans

les eaux superficielles, l'origine du cadmium doit être cherchée dans les effluents industriels [85]. Le cadmium métal n'est pas hydrosoluble, par contre certains de ses sels (chlorures, nitrates, sulfates, etc.) le sont. Les carbonates et hydroxydes de cadmium deviennent solubles à des pH acides. Pour les eaux destinées à la consommation humaine, l'OMS recommande une valeur limite de 3 µg/l; les directives du Conseil des Communautés européennes et la réglementation française fixent une valeur limite de 5 µg/l.

Le cadmium est l'un des éléments les plus néfastes pour la santé des êtres vivants et pour l'environnement. Le principal danger du cadmium réside dans son effet cumulatif dans le foie puis dans les reins. Il se lie aux protéines pour former des complexes qui sont transportés jusqu'aux reins, où il endommage les mécanismes de filtration. Il peut entraîner, notamment, des lésions des tissus rénaux (concentration dépassant 200 ppm) se traduisant par une protéinurie, une glucosurie, et une aminoacidurie ainsi qu'une pathologie osseuse. Parmi les problèmes que le cadmium peut provoquer, on peut citer: diarrhée, douleurs d'estomac et vomissement important (accompagné de crampes musculaires et d'une hypersalivation), cassure des os, infertilité, problème au système nerveux central, problème au niveau du système immunitaire, désordre psychologique, altération de l'ADN ou développement de cancer...

c- Le chrome

Le chrome occupe le 21ème rang dans le classement des éléments par ordre d'abondance dans la croûte terrestre.

Le chrome présent dans l'environnement aquatique provient de l'altération et de l'érosion des roches, des émissions volcaniques et des activités industrielles. Il s'agit d'un élément largement distribué dans la croûte terrestre. Le chrome est le plus souvent extrait d'un minerai l'oxyde mixte FeCr_2O_4 : la chromite. Les utilisations industrielles du chrome sont nombreuses et conduisent dans certains cas à de graves pollutions environnementales. Le chrome est utilisé dans les industries chimiques où il sert de catalyseur dans les synthèses organiques [86] [87], dans l'industrie des peintures et colorants, dans l'industrie du bois où il sert de produit de conservation, dans la production de films photographiques et de cassettes magnétiques, dans l'industrie de cuivre où les sels de chrome trivalent sont largement utilisés comme agent de tannage [60].

Le chrome à l'état de cation dans l'eau de surface n'est fréquente que lorsque le pH est bas. Les eaux douces superficielles n'en contiennent que de faibles quantités (de 5 à 10 µg/l) [85].

Le chrome est plus souvent présent dans les rejets d'eaux usées ou dans les stations d'épuration [88]. Malgré la grande insolubilité du chrome, la solubilité du chrome VI est plus importante que celle du chrome III. L'OMS ainsi que les directives du Conseil des communautés européennes et la réglementation française relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine ont adopté comme valeur limite du chrome le chiffre de 0,05 mg/l. En raison du caractère cancérigène par inhalation, le Centre International de recherche sur le cancer a classé le chrome VI comme cancérigène pour l'homme [89].

La toxicité du chrome dépend de son état physicochimique. Ses sels hexavalents sont considérés comme les plus dangereux [90]. En ce qui concerne les milieux aquatiques, les organismes inférieurs sont plus sensibles que les poissons. A faible dose, le chrome (III) est un nutriment essentiel pour l'homme puisqu'il joue un rôle indispensable dans le métabolisme glucidique comme activateur de l'insuline [60]. Sa carence peut provoquer des problèmes cardiaques, des perturbations du métabolisme et du diabète (interruption du métabolisme du sucre). Mais l'absorption excessive de chrome (III) peut aussi provoquer des problèmes de santé, par exemple des éruptions cutanées. Le chrome (VI) est dangereux pour la santé. Il peut avoir des conséquences qui sont: éruptions cutanées, ulcération de la muqueuse gastro-intestinale, système immunitaire affaibli, dommage (grossissement parfois compliqué d'une hépatite toxique avec ictère) au foie et aux reins, altération du matériel génétique, cancer des poumons, etc. Les risques associés à l'emploi des dérivés chromiques sont apparus à la suite des multiples atteintes par des cancers du poumon reportés en Allemagne en 1930, chez les ouvriers d'industries de production de chromates [60]. Au début des années 1970, des travaux épidémiologiques effectués aux Etats Unis ont montré l'augmentation du risque d'exposition au cancer des poumons chez les employés des usines de production de chromates et d'industries de fabrication des pigments à base de chrome [91].

d- Le manganèse

Le manganèse est un minéral qui est indispensable au fonctionnement de bon nombre de familles enzymatiques. Il est nécessaire à l'homme pour la croissance, pour le métabolisme des glucides et des lipides [85]. Il est assez répandu dans la nature et s'emploie dans de nombreuses applications industrielles: métallurgie, industrie électrique, industrie chimique, industrie de verre et de la céramique, carburant.

Dans l'eau, le manganèse se trouve à des degrés d'oxydation différents (II, III et IV). Sa solubilité dépend du pH, de l'oxygène dissous, de la présence d'agents complexants. Les eaux de surface en contiennent généralement moins de 0,05 mg/l.

En plus de son rôle essentiel dans le corps, une absorption excessive des composés de manganèse peut affecter plusieurs systèmes organiques chez l'être humain, le plus sensible étant le système nerveux central, mais aussi les systèmes respiratoire, reproducteur et cardiaque. Une exposition à des concentrations très élevées de manganèse, peut causer une grave maladie neurologique clinique appelée «manganisme» qui se manifeste par les changements comportementaux (fatigue, maux de tête, perte d'appétit, irritabilité et agressivité).

e- Le fer

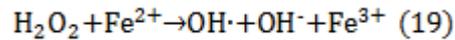
Le fer est très répandu dans la croûte terrestre. Il s'emploie largement dans la métallurgie et ses utilisations dans la chimie sont très variées. Le fer est un micronutriment essentiel à la vie. Il entre dans la constitution de l'hémoglobine (complexe dont il est l'élément central). Il intervient dans de nombreuses fonctions enzymatiques. Ces rôles multiples dans l'organisme font qu'une carence en fer peut avoir des conséquences variées. La carence ou l'excès en fer sont l'un comme l'autre nuisible. Le fer est soluble à l'état d'ion ferreux (Fe^{2+}) et insoluble à l'état d'ion ferrique (Fe^{3+}). Il peut exister à l'état colloïdal sous forme d'hydroxydes, ou sous forme de complexes organiques et minéraux.

Les eaux de surface peuvent contenir jusqu'à quelques mg/l de fer. Le fer peut se rencontrer jusqu'à 10 mg/l dans les eaux de sondage. Les eaux minérales peuvent en contenir plus de 10 mg/l [85].

Pour l'eau destinée à la consommation humaine, l'OMS recommande une valeur guide de 0,3 mg/l. Les directives du Conseil des communautés européennes et la réglementation française indiquent un niveau guide de 0,2 mg/l.

Le fer est l'un des éléments qui permet d'apprécier l'impact de rejets polluants. La présence de fer dans l'eau peut favoriser la prolifération de certaines souches de bactéries qui précipitent le fer ou corrodent les canalisations [92]. Le fer au-delà de 0,1 mg/l est gênante car elle va conférer à l'eau une couleur jaune à orangée, provoquer des dépôts d'hydroxyde ferrique, donner à l'eau un goût métallique désagréable et tâcher le linge. Le fer favorise la production des radicaux libres oxygénés (potentiellement toxiques, pour les lipides, les

protéines ou l'ADN). Le fer (II) favorise la formation du radical le plus dangereux pour l'organisme: le radical OH• cette réaction dite de Fenton se déroule en présence de l'eau oxygénée:



f- Le nickel

Les principales sources anthropiques du nickel sont l'incinération de déchet, l'épandage des bords d'épuration, la fabrication de l'acier, le nickelage et les fonderies de plomb. Le nickel à l'état divalent peut former une large gamme de composés. Le nickel reste très faiblement absorbé par la plupart des organismes vivants, mais est associé en grande partie à la matière particulaire. En milieu aqueux, les ions nickel sont hexahydratés. Des anions tels que OH⁻, SO₄²⁻ et Cl⁻, ne forment des complexes avec le nickel que dans une faible proportion. Le complexe Ni(OH)₂ est l'espèce dominante au-delà d'un pH de 9,5. En présence de soufre et en milieu aqueux, du sulfate de nickel se forme, ce qui limite sa solubilité [93].

La présence du nickel dans les eaux de surface est principalement liée aux activités humaines. Les quantités retrouvées dans les eaux de surface varient de quelques microgrammes à 100 µg/l.

Le nickel et ses sels excepté le nickel carbonyle sont relativement peu toxiques [85]. Le nickel ne se révèle pas dangereux aux doses rencontrées habituellement dans les aliments et l'eau. Le nickel et ses dérivés sont absorbés par voie respiratoire et dans une moindre mesure par ingestion. Les composés solubles du nickel (chlorure, sulfate) sont plus facilement absorbés par le tractus respiratoire. Par voie orale, quarante fois plus de nickel sont absorbés par le tractus intestinal lorsque le sulfate de nickel est administré dans l'eau de boisson par rapport à son administration par la nourriture [94].

Dans les eaux destinées à la consommation humaine, l'OMS, les directives du Conseil des communautés européennes et la réglementation française indiquent une valeur limite de 20 µg/l.

g- Le cuivre

Le cuivre est présent dans la nature sous forme de minerais de cuivre, de minerais oxydés ou sulfurés [90]. Le cuivre est l'un des métaux les plus employés à cause de ses propriétés

physiques exceptionnelles : excellente conductibilité électrique et thermique ainsi que sa résistance à la corrosion. En métallurgie, il entre dans de nombreux alliages parmi lesquels le laiton (cuivre et zinc), le bronze (cuivre et étain), le maillechort (cuivre, nickel et zinc) [95]. En dehors de pollutions industriels et de traitements agricoles, le cuivre provient habituellement de la corrosion des tuyauteries de distribution [90]. Le cuivre métallique est insoluble dans l'eau, mais bon nombre de ses sels sont solubles. Dans les eaux de surface la teneur en cuivre est inférieure à 1 mg/l.

Le cuivre joue un rôle important dans différents métabolismes (coenzymes de métalloprotéines) et dans la synthèse de l'hémoglobine. Le cuivre est un élément métallique essentiel pour les organismes vivants. Cependant au dessus d'une certaine concentration, il devient toxique. Il représente donc, via ses rejets, une menace potentielle pour les milieux aquatiques [96].

Pour l'eau destinée à la consommation humaine, l'OMS recommande une valeur limite de 2 mg/l.

h- Le Zinc

Couramment répandu sur le globe, le zinc se rencontre notamment à l'état naturel sous forme de sulfure (blend) et dans des minerais de plomb dans lesquels il est toujours associé au cadmium. L'industrie emploie le zinc dans divers domaines ; protection des métaux contre la corrosion (galvanisation), fabrication de caoutchouc, imprimerie, piles, teinture, engrais, pharmacie... Il sert d'agent réducteur en chimie organique et de réactif en chimie analytique.

Le zinc existe dans l'eau sous diverses formes d'ions hydratés $Zn(H_2O)^{2+}$, de complexe avec les ligands organiques ou adsorbés sur des matières solides... Son comportement dans le milieu aquatique est très complexe et dépend de nombreux facteurs abiotiques tels que le pH, la quantité de matière organique dissoute, le potentiel redox, etc. [97]. La concentration du zinc dans l'eau naturelle est généralement faible et diminue le plus souvent par suite de son adsorption sur les matières en suspension et les sédiments. La solubilité des sels de zinc (chlorure et sulfate) peut être importante.

Le zinc est un oligoélément essentiel au métabolisme humain. Le zinc dans l'eau ne présente pas d'effet toxique pour l'homme. Les manifestations d'intoxication aiguë se traduisent entre autre par des troubles digestifs [98]. Pour l'eau destinée à la consommation humaine, l'OMS recommande comme valeur limite 3 mg/l.

i- Les anions

La concentration des anions dans les eaux naturelles est très variable. Pour les fluorures, elle dépend du type de formation géologique et de l'importance des précipitations. La formation des sels métalliques par voie directe découle d'une attaque oxydante : le métal est oxydé en ion positif (cation) et se combine alors avec un ion négatif (anion) pour donner un sel. Les anions pouvant former des sels avec les métaux, les plus courants sont : chlorure, sulfate, sulfure, nitrate, oxyde et hydroxyde. Dans l'eau les métaux sont présents sous forme d'oxyde ou de sels. La plupart des sels des métaux sont solubles, et c'est sous cette forme que les métaux contaminent l'environnement et en particulier l'alimentation.

Les ions chlorures : Les ions chlorures sont présents dans toutes les eaux à des concentrations variables. La présence des ions chlorures dans les eaux naturelles est due au lessivage des roches et des sols sédimentaires, de la désinfection des eaux domestiques, des procédés industriels qui emploient le chlore comme agent de blanchiment et agents de nettoyage domestique. Dans les eaux de surface, les teneurs naturelles sont souvent inférieures à 10 mg/l, voire à 1 mg/l. Les ions chlorures ne sont pas toxiques pour l'homme. Néanmoins quand le chlore est en concentration assez élevée dans l'eau de réseau, elle lui confère odeur et saveur non agréables.

Les ions nitrates et nitrites : L'azote ammoniacal dans les eaux naturelles peut provenir du lessivage des terres agricoles et des minéraux argileux. L'ion nitrate (NO_3^-), soluble dans l'eau, est la principale forme d'azote combiné trouvée dans les eaux naturelles. Il constitue le stade final de l'oxydation de l'azote. Sans apport artificiel, les eaux de surface ne contiennent pas plus de 10 mg/l de nitrate. Les effluents industriels, agricoles, urbains, les déjections humaines ou animales élèvent les teneurs en nitrates des eaux de surface et souterraine. Les doses importantes ont pour origine les engrais et les rejets d'eaux usées. La teneur en nitrates dans les aliments doit être la plus faible possible, car ils peuvent réagir dans le corps humain pour former des nitrites et ultérieurement des nitrosamines, qui sont connues pour être des substances cancérigènes. Chez les enfants, l'absorption d'eau contenant des nitrates peut conduire à des maladies graves. Dans l'intestin les nitrates sont transformés en nitrites, qui oxydent l'hémoglobine du sang et empêche de cette manière le transport de l'oxygène. L'ion nitrite est la principale cause de la présence de méthémoglobine dans le sang. Des concentrations assez importantes de nitrite peuvent être trouvées surtout sous forme de produits intermédiaires des processus d'oxydation ou de réduction des composés azotés

organiques [98]. L'ion nitrite (NO_2^-) s'oxyde facilement en ion nitrate et, pour cette raison, il est rarement présent en concentration importante dans les eaux naturelles.

Les ions phosphates : Le phosphore total est l'ensemble du phosphore présent dans un échantillon sous forme de phosphates ou de composés organophosphorés. La présence de phosphore dans les eaux naturelles provient du lessivage de certains minéraux et de la décomposition de la matière organique [99]. Dans les eaux de surface, la teneur naturelle en phosphate ou orthophosphate est de l'ordre 0,1 mg/l. Mais aujourd'hui elle atteint des valeurs très élevées. Le rejet des eaux domestiques et industrielles ainsi que le drainage des terres agricoles fertilisées contribuent à en augmenter la concentration. A concentration modérée le phosphore n'est pas toxique pour l'homme, les animaux ou les poissons. Des concentrations élevées d'azote dans l'eau combinées à la présence de phosphore peuvent occasionner une prolifération de plantes et d'algues, ce qui conduit à la réduction de la teneur en oxygène, parfois jusqu'à une teneur létale pour le milieu aquatique. La prolifération de certaines algues peut également entraîner la production de toxines nuisibles à la santé des organismes aquatiques et par voie de conséquence, aux humains.

Les ions sulfates : Ce sont des composés naturels des eaux et sont liés aux cations majeurs. Les ions sulfates sont pour la plupart solubles dans l'eau. Les sulfates peuvent être réduits en sulfure, transformés en hydrogène sulfuré (H_2S) et même précipité en sel insoluble ou assimilés par des organismes vivants. Dans les eaux de surface, la concentration en sulfate est très variable mais ne dépasse pas le gramme par litre. Les ions sulfates sont peu toxiques ; on observe un léger effet purgatif chez l'homme lorsque les doses dépassent le gramme par litre.

Les ions fluorures : Les fluorures sont présents naturellement dans l'eau de surface à des teneurs généralement inférieures à 1 mg/l. Mais ils peuvent atteindre parfois 10 mg/l. Les eaux usées provenant de certaines usines qui produisent des composantes électroniques et des fertilisants agricoles peuvent contenir des concentrations importantes d'ions fluorures, ce qui augmente la teneur naturelle en fluor du cours d'eau récepteur. Cette teneur peut également croître en période de sécheresse prolongée, alors que l'évaporation est importante. Les caractéristiques physicochimiques de certains sols favorisent la dissolution des minéraux qui contiennent du fluor. Une carence ou un excès en fluor peut provoquer des inconvénients alors que des doses modérées sont bénéfiques pour la santé. Si à faibles doses le fluor est un élément protecteur de l'émail des dents, à fortes doses il entraîne la fluorose du squelette et présente une toxicité aigüe. Ainsi, une eau qui contient environ 1,2 mg/l d'ions fluorures

contribue à renforcer l'émail des dents (ce qui réduit les risques d'apparition de la carie dentaire), alors qu'une eau dont la concentration d'ion fluorure est supérieure à 1,5 mg/l favorise la fluorose dentaire (hypercalcification de l'émail des dents due à une trop forte adsorption d'ions fluorures) [10].

I.13- L'eutrophisation

Ce phénomène dû à l'enrichissement des eaux en éléments nutritifs (composés phosphorés et azotés essentiellement) peut déclencher la prolifération des algues et des plantes aquatiques. Selon Guy Barroin [99], un plan d'eau au cours de son vieillissement voit évoluer son état entre deux extrêmes: l'état oligotrophe et l'état eutrophe. L'eutrophisation désigne le passage d'un état oligotrophe à un état eutrophe. L'état oligotrophe est caractérisé par une grande profondeur, une faible fertilité, d'où une végétation rare et une population de poissons peu abondante mais de qualité. L'état eutrophe est caractérisé par une faible profondeur, une forte fertilité, d'où une végétation riche et des poissons abondants mais de piètre qualité. L'azote et le phosphore responsables de l'eutrophisation, lorsqu'ils s'y trouvent en excès. Ces éléments nutritifs proviennent de sources variées, situées aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur du plan d'eau. Les eaux transportant des déchets d'élevage et les eaux d'égout contiennent de grandes quantités de composés phosphorés et azotés sous forme chimique facilement assimilable par les algues et autres plantes aquatiques. Plusieurs facteurs, aussi bien naturels qu'humains, contribuent à l'eutrophisation. Ainsi, la situation géographique, le climat, l'hydrologie, la géologie, ainsi que la topographie et la géochimie sont des facteurs naturels. Le climat influence le régime des cours d'eau en agissant sur l'apport annuel d'eau et d'énergie, ainsi que sur le transport des nutriments et sédiments vers le plan d'eau.

Le ruissellement des eaux est connu pour être responsable de l'érosion des sols et du transport des particules vers le plan d'eau. A cause des apports de substances nutritives dans les eaux, les algues se développent plus rapidement. En conséquence, il pénètre moins de lumière solaire dans les couches d'eaux profondes ce qui a pour effet la réduction de la photosynthèse. En conséquence, il y a moins d'oxygène produit. Au fur et à mesure que les algues meurent, elles se déposent au fond du plan d'eau. Leur décomposition par des bactéries entraîne parfois une réduction de l'oxygénation des eaux profondes. L'oxygène n'est alors plus en quantité suffisante dans les eaux pour les besoins des organismes supérieurs, entraînant par exemple la mort des poissons. L'eutrophisation accélérée peut aussi engendrer d'importants problèmes de santé notamment dans des pays tropicaux où elle rend parfois les

conditions plus propices au développement de maladies parasitaires telles que le paludisme, la bilharziose ou l'onchocercose.



Photo 1.5. Utilisation abusive de lessive, conséquence de l'eutrophisation (PDV)

CHAPITRE 2

MATERIEL ET METHODES

II.1- Localisation des points de prélèvement

Au total 12 points de prélèvement ont fait l'objet d'échantillonnage, suivant l'écoulement du fleuve (figure 2.1). Les points amont (AM) et aval (AV) sont situés respectivement à 75 mètres de chaque exutoire.

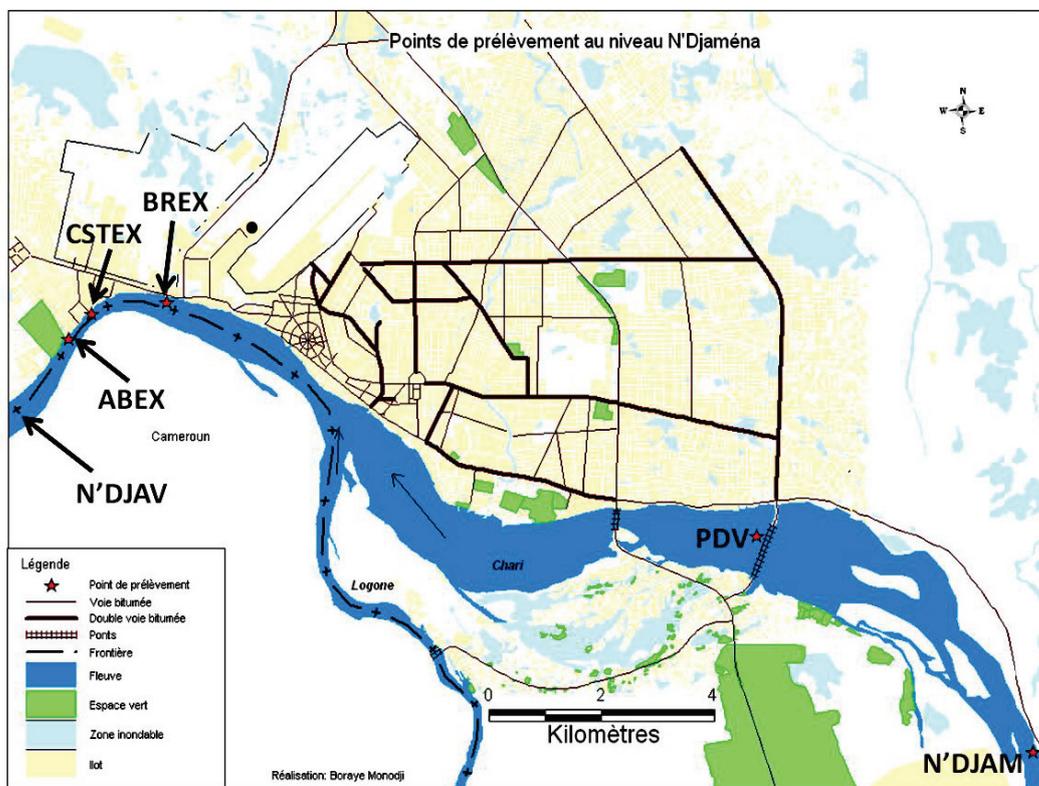


Figure 2.1. Localisation des points de prélèvement

Les différents points de prélèvement ont été choisis selon leur accessibilité et leur proximité d'éventuelles sources de pollution. Leur répartition géographique est la suivante :

- **N'DJAM** : c'est le point de prélèvement situé à 5 kilomètres de l'entrée de la ville. Il représente le point de prélèvement en amont de N'Djaména.

- **PDV** : c'est le point de prélèvement au niveau du pont à double voie et qui est situé à 10 km du point N'DJAM.
- **BREX** : c'est l'exutoire des brasseries (**BR**) du Tchad. Les brasseries du Tchad se situent à une trentaine de kilomètres du point N'DJAM.
- **CSTEX** : c'est l'exutoire de la compagnie sucrière du Tchad (**CST**) qui est la société de fabrication de sucre à partir de la canne à sucre. Ce point se situe à 2 kilomètres du point BREX.
- **ABEX** : c'est l'exutoire des abattoirs (**AB**) qui est une société moderne de conditionnement de viande. ABEX se situe à 2 kilomètres de CSTEX.
- **N'DJAV** : c'est le point de prélèvement situé à 5 kilomètres de CSTEX. Il représente le point de prélèvement en aval de N'Djamena.

Tableau II.1. Localisation géographique des stations échantillonnées dans la zone d'étude

Station	X	Y
N'DJAM	15°09'04.219''	12°03'12.559''
PDV	15°06'21.3589''	12°05'11.223''
BREX	15°00'34.077''	12°07'19.866''
CSTEX	14°59'49.480''	12°07'13.390''
ABEX	14°59'36.405''	12°06'59.900''
N'DJAV	*ND	ND

*ND : non déterminé

II.2- Période d'étude

Les paramètres physico-chimiques sont déterminés à partir de prélèvements mensuels effectués sur les sites tout au long du fleuve Chari. Les échantillons ont été prélevés et analysés en octobre, novembre, décembre 2008, en janvier, juillet, octobre, novembre et décembre 2009 et janvier 2010.

II.3- Matériel

Les mesures physicochimiques des eaux du fleuve Chari ont porté sur la détermination du pH (mesuré avec un pH mètre ISO-SCAN), de la température, de la conductivité électrique (WTW-315i/SET), de la turbidité (HACH LANGE 2100 ISO), de l'oxygène dissous

(oxymètre HACH LANGE HQ 30d à sonde) de la DCO et DBO₅. Le reste des évaluations ont porté sur les anions (nitrate et phosphate), et les métaux lourds qui ont été réalisées au laboratoire par spectrophotométrie HACH DR2400, spectrométrie d'absorption atomique et par chromatographie ionique.

II.4- Méthodologie d'analyse

Etant donné la charge organique des eaux et leur biodégradation rapide, les paramètres physicochimiques susceptibles d'être altérés (conductivité, température, turbidité, pH, oxygène dissous) ont été mesurés *in situ* tandis que les autres (métaux et anions) ont été effectués au laboratoire. Les concentrations en métaux ont été mesurées par spectrophotométrie HACH modèle DR2400 (dans les 24 heures qui ont suivi le prélèvement), par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) et par ICP-AES (1 à 6 mois plus tard). Pour l'analyse des métaux dissous (par SAA et par ICP-AES), les échantillons ont été acidifiés (HNO₃ à 4%) puis filtrés (filtration sur membrane millipore à 0,45µm). La filtration a eu assez d'irrégularités sur les résultats, ce qui explique la différence entre les résultats obtenus par les différentes méthodes d'analyse.

La minéralisation des eaux a été effectuée selon les normes ISO (1994) par un mélange d'eau régale et d'eau oxygénée à chaud.

Méthodes de référence

AFNOR NF EN ISO 14911 (octobre 1999). Dosage par chromatographie ionique des ions Li⁺, Na⁺, NH₄⁺, Mn²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Sr²⁺ et Ba²⁺ dissous. Méthode applicable pour l'eau et les eaux résiduaires.

FD 90-112 (juillet 1998). Qualité de l'eau. Dosage de 8 éléments métalliques (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Pb) par spectrométrie d'absorption atomique dans la flamme.

AFNOR NF ISO 11885 (mars 1998). Qualité de l'eau. Dosage de 33 éléments par spectroscopie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (indice de classement T90-136).

II.4.1- La spectrométrie d'absorption atomique

La spectrométrie d'absorption atomique est une méthode d'analyse quantitative qui permet de doser une soixantaine d'éléments chimiques à l'état de traces. Elle permet d'analyser

directement des eaux exemptes de particules après une simple acidification. L'analyse est basée sur la mesure de l'absorption d'une onde électromagnétique par un atome lorsqu'il est éclairé par une source lumineuse de longueur d'onde spécifique.

Le spectromètre utilisé est un « Perkin Elmer Instruments AAnalyst 300 » à flamme air acétylène.

Les solutions pour l'étalonnage ont été préparées selon la norme à partir de solutions standard à 1g/l. Les concentrations des solutions filles varient de 0,01 à 4 mg/l.

II.4.2- Absorption atomique à vapeur froide

Le dosage du mercure est effectué par spectrométrie d'absorption atomique à longueur d'onde 253,7 nm. Le spectromètre d'absorption atomique utilisé est un « Varian Spectre AA-400 plus » muni d'une cellule en quartz MHS-10 Perkin-Elmer.

La détermination du mercure s'effectue en deux étapes après minéralisation. La première consiste à oxyder toutes les formes de mercure à l'état bivalent (mercure II) à l'aide d'une digestion acide (HNO_3) en milieu oxydant (KMnO_4). Dans la deuxième étape, l'agent réducteur, le chlorure stanneux réduit les ions mercuriques en mercure élémentaire. Le mercure est alors libéré de sa solution et entraîné par un courant de gaz inerte (l'azote) vers la cellule du spectromètre d'absorption atomique. La concentration de l'échantillon est déterminée par comparaison entre les absorbances respectives de l'échantillon et des solutions étalons. Cette technique de détermination est plus sensible que celle par la spectrométrie d'absorption atomique à flamme.

Préparations des solutions étalons et des blancs

Nous avons préparé une série d'étalons. A l'aide de la pipette, nous avons introduit dans 5 fioles jaugées de 50 cm³, 10 ml d'eau ultra pure et 15 ml de solution de permanganate de potassium acidifié (HNO_3 65%). Nous avons ensuite introduit dans les 5 fioles jaugées, successivement 10, 25, 50, 75 et 100 µl de la solution étalon de mercure 1,03 mg/l. Nous avons bien homogénéisé ces solutions dont les concentrations en mercure sont respectivement 0,41 ; 1,03 ; 2,06 ; 3,09 et 4,12 µg/l.

Nous avons préparé le blanc dans le godet du spectromètre en mélangeant 15 ml de la solution au permanganate acidifié (HNO_3 65%) avec 10 ml de l'eau ultra pure.

Nous avons réglé la longueur d'onde et les divers paramètres comme indiqué sur la fiche de l'appareil et relatif au mercure. Nous avons ensuite mesuré l'absorbance des divers étalons puis celle des échantillons neutres et échantillons dopés à 100 µl de la solution de mercure 1,03 mg/l.

II.4.3- Spectrométrie d'émission à plasma inductif (ICP)

La spectrométrie d'émission à plasma inductif appelée ICP (*Inductively Coupled Plasma*) est une technique récente qui offre des possibilités intéressantes : sensibilité supérieure à la SAAF et peu d'interférences. Elle permet la détermination simultanée de nombreux éléments.

Préparation des échantillons, des standards et des blancs

Les solutions pour l'étalonnage ont été préparées à partir des solutions mères de métaux correspondants (1g/l) dans une fiole jaugée de 1000 ml. Ces solutions mères multiéléments (Cd, Cu, Pb, Fe, Ni, Zn, Mn, Cr) contiennent de l'acide nitrique pur à 65%. La solution étalon de concentrations intermédiaires est obtenue par dilution des solutions mères. Cette solution a servi à la préparation de la gamme d'étalonnage. Sa concentration est de 10 mg/l pour chaque élément. Pour sa préparation, nous avons utilisé une fiole jaugée de 1000 ml dans laquelle nous avons introduit 10 ml de la solution mère. Nous avons ajouté 5 ml d'acide nitrique concentré, puis nous avons complété à 1000 ml avec de l'eau ultra-pure.

La solution intermédiaire est utilisée pour préparer les solutions d'étalonnage dans la gamme de travail choisie: 0,005 mg/l à 1 mg/l.

Le blanc d'étalonnage est préparé en ajoutant à de l'eau ultra-pure 5 ml d'HNO₃ par litre.

II.4.4- La chromatographie ionique en phase liquide

La chromatographie ionique en phase liquide permet l'identification et la quantification simultanées de divers ions (cations et anions) inorganiques et organiques.

L'appareil utilisé pour cette technique est un Metrohm 792 Basic IC. Il est équipé d'une colonne contenant une résine échangeuse d'ions et d'un détecteur conductimétrique différentiel après suppression d'une partie de la conductivité à l'aide d'un dispositif électromembranaire. L'éluant est constitué d'un mélange de carbonate et d'hydrogencarbonate de sodium dont la concentration définit la vitesse d'éluion (fonction croissante). Les conditions opératoires sont les suivantes : débit de l'éluant 0,8 ml/min à une

pression de 12 MPa. Des étalonnages sont réalisés à diverses concentrations: 5, 10, 20, 30 mg/kg pour chaque ion. Les temps de rétention varient de 4,06 à 4,5, de 6,15 à 6,7, de 10,92 à 11,1 de 13,57 à 14 et de 16,46 à 17 minutes respectivement pour les ions F^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} et SO_4^{2-} .

II.4.5- Spectrophotomètre modèle DR2400

Le DR 2400 est un photomètre simple d'utilisation confortable. Son domaine spectral est compris entre 400 et 880 nm avec une plage de température d'utilisation allant de 0 à 40°C.

Principe de mesure des paramètres par le spectrophotomètre DR 2400

Lorsqu'un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde λ d'intensité I_0 , traverse une solution à analyser, il subit une absorption et sort avec une intensité affaiblie I . Cette diminution d'intensité est due à l'absorption d'une ou plusieurs fréquences par le milieu traversé. De la proportion d'intensité lumineuse absorbée par la solution, on peut déduire la concentration C (mg/l) de la substance absorbante par la relation de Beer-Lambert selon l'expression :

$$D = \log I_0/I = alc$$

Où a est le coefficient d'absorption molaire ; il dépend de la nature de la substance absorbante, de la longueur d'onde. l est le parcours optique de la radiation à travers la solution. c est la concentration de la solution.

Les composantes inorganiques de l'échantillon d'eau sont mis en présence de réactifs spéciaux. L'intensité de la couleur produite est mesurée. Celle-ci est une mesure de la concentration en ions inorganiques à analyser. Pour chaque essai, on fait une analyse à blanc avec de l'eau distillée et les réactifs.

Pour déterminer la teneur totale en métaux, l'échantillon doit être homogénéisé avant la préparation afin de répartir uniformément toutes les matières solides. La filtration est ainsi évitée car, dans le cas contraire, les métaux déposés sur les matières solides sont éliminés et ne sont pas pris en compte dans la mesure. Afin d'éviter toute précipitation d'hydroxyde, le contrôle du pH est nécessaire après la préparation. La plage du pH optimale (entre 2 et 5) est atteinte après l'ajout de la solution tampon CRACK SET ou d'acide sulfurique.

L'analyse des métaux requiert une digestion préalable. Pour une grande précision des résultats, il faut déterminer la valeur du blanc pour chaque nouveau lot de réactifs. Une coloration apparaît en présence du métal, après l'ajout du réactif.

Nickel

Pour le dosage du Nickel, nous avons utilisé la méthode utilisant le réactif 1-(2-pyridylazo)-2-Naphtol (PAN), et permettant l'analyse dans la gamme de concentration 0,007 à 1 mg/l.

Une fois l'échantillon tamponné et le fer (III) masqué par le pyrophosphate, le nickel réagit avec le 1-(2-pyridylazo)-2-naphtol (indicateur). L'indicateur forme de complexes avec la plupart des métaux présents. Après virage de la couleur, l'EDTA est ajouté pour détruire tous les complexes métal-PAN, à l'exception du nickel et du cobalt. L'appareil s'adapte automatiquement à l'interférence due au cobalt en mesurant l'absorbance de l'échantillon à 860 nm. Cette méthode est unique en son genre dans la mesure où elle permet l'analyse du nickel et du cobalt à partir d'un même échantillon.

Zinc

Le dosage du zinc a été réalisé par la méthode Zincon permettant les mesures dans la gamme de concentration de 0,01 à 2,00 mg/l.

Les métaux forment des complexes avec le cyanure. L'ajout de cyclohexanone provoque une libération sélective du zinc. Le zinc réagit ensuite avec l'indicateur, le 2-carboxy-2-hydroxy-5-sulfoformazyl benzène (zincon) pour former des espèces de couleur bleue. La coloration bleue est masquée par la coloration brune de l'indicateur en excès. L'intensité de la coloration bleue est proportionnelle à la concentration en zinc. La lecture est obtenue à 620 nm.

Cuivre

Pr le cuivre, la méthode Hach utilisée est la méthode porphyrine (C₂₀H₁₄N₄). C'est une méthode qui permet des mesures dans la gamme de concentration allant de 2 à 210 µg/l. La méthode est exempte de la plupart des interférences et ne nécessite pas d'extraction ou de préconcentration. Les interférences des autres métaux sont éliminées par les réactifs masquant du cuivre.

Le cuivre de l'échantillon réagit avec le sel de l'acide bicinchoninique du réactif au cuivre CuVer1 ou CuVer2 pour former un complexe dont la coloration mauve est proportionnelle à la concentration du cuivre. La lecture est obtenue à 560 nm.

Fer

Pr cet élément, nous avons utilisé la méthode au Ferro Ver. Elle permet des mesures dans une gamme de concentration allant de 0,02 à 3 mg/l.

Le réactif du FerroVer convertit la totalité du fer soluble et la plus grande partie du fer insoluble de l'échantillon en fer ferreux soluble. Le fer ferreux réagit avec la 1,10 phénanthroline (indicateur) du réactif pour développer une coloration proportionnelle à la concentration du fer. La lecture est obtenue à 510 nm.

Chrome

Le chrome est déterminé par la méthode au 1,5-diphénylcarbohydrazide à l'aide du réactif au chrome le chroma Ver3. Ce réactif contient un tampon acide associé à du 1,5-diphénylcarbohydrazide, qui réagit en produisant une coloration violette en présence du chrome. La lecture est obtenue à 540 nm. Avec cette méthode, on peut réaliser des analyses dans une gamme de concentration de 0,01 à 0,70 mg/l.

Manganèse

La méthode Hach adopté est la méthode au PAN. Avec cette méthode, on peut réaliser des analyses dans une gamme de concentration de 0,007 à 0,70 mg/l. Un réactif à l'acide ascorbique est utilisé dans un premier temps pour réduire toutes les formes oxydées du Mn en Mn^{2+} . Un réactif de cyanure alcalin est ajouté pour masquer des interférences potentielles. Ensuite l'indicateur PAN ajouté se combine au Mn^{2+} pour former un complexe de couleur orange. La lecture est obtenue à 560 nm.

Nitrate

Pour le nitrate, c'est la méthode de réduction au cadmium qui a été utilisée. Elle permet des analyses à des concentrations entre 0,3 et 30 mg/l.

Le nitrate présent dans l'échantillon réagit avec l'acide chromotropique en conditions fortement acides pour former un produit jaune dont l'absorbance maximale se mesure à 410 nm.

Phosphate

La méthode du photomètre Hach pour l'analyse du phosphate est la méthode au molybdovanadate avec digestion au persulfate en milieu acide. Elle permet des mesures de concentration de 1 à 100 mg/l en PO_4^{3-} .

Le phosphate réagit avec le molybdate en milieu acide pour produire un complexe mixte phosphate/molybdate. Ensuite, l'acide ascorbique réduit le complexe, provoquant une forte coloration bleue de molybdène. La lecture est obtenue à 880 nm.

II.4.6- Mesure manométrique de la DBO (Demande biochimique en oxygène)

La mesure de la DBO5 est faite à l'aide de HACH LANGE BOD TRAK. Le principe consiste à déterminer la quantité d'oxygène consommé au bout de 5 jours d'incubation à 20°C dans une solution diluée de l'échantillon. Pour déterminer la DBO5, deux mesures de l'oxygène dissous doivent être effectuées :

- à l'instant $t = 0$, au moment de l'incubation ;
- à l'instant $t = 5$ jours, après 5 jours d'incubation.

Lorsque les bactéries fractionnent des substances contenues dans l'échantillon, elles consomment de l'oxygène et produisent du gaz carbonique. La consommation en oxygène entraîne la réduction de la pression dans les flacons, au fur et à mesure que la quantité équivalente de CO_2 générée est captée par le LiOH. Le BOD TRAK donne la valeur de DBO (en mg/l) à partir de la pression mesurée.

II.4.7- Mesure de la DCO (Demande chimique en oxygène)

Les résultats de la DCO en mg/L expriment la quantité (en mg) d' O_2 consommée par litre d'échantillon dans les conditions de ce protocole. Dans cette méthode, l'échantillon est chauffé pendant 2 heures en présence d'un oxydant puissant, le bichromate de potassium. Les composés organiques oxydables réagissent en réduisant l'ion bichromate ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) en ion chromique de couleur verte (Cr^{3+}). Dans la méthode de détermination par colorimétrie ou

titrimétrie, pour la concentration de 3 à 150 mg/L, l'analyse porte sur le résidu de Cr^{6+} . Dans la méthode par colorimétrie pour la concentration de 20 à 1500 mg/L ou de 200 à 15.000 mg/L, la détermination porte sur la quantité de Cr^{3+} produite. Le réactif pour DCO contient des ions argent et mercure. L'argent agit comme catalyseur, tandis que le mercure est utilisé pour complexifier les interférences dues au chlorure. Les lectures sont obtenues à 420 nm pour la gamme de 3 à 150 mg/L et à 620 nm pour les gammes de 20 à 1.500 mg/L et de 200 à 15.000 mg/L.

II.4.8- L'analyse statistique ACP (Analyse en composantes principales)

a- Le logiciel Jump 9

Le logiciel Jump est un logiciel développé pour exécuter des analyses statistiques telles que l'analyse exploratoire de données (méthodes des moindres carrés partiels, analyse en composantes principales, analyse factorielle discriminante,..), des tests statistiques (test de Student, test de Fisher,..) ou de l'étude des plans d'expériences...

Ce logiciel est utilisé dans de nombreux secteurs d'activités comme la biotechnologie, la chimie de transformation, l'industrie pétrolière ou l'industrie pharmaceutique...

Le logiciel Jump a été utilisé dans le cadre de notre projet pour réaliser des analyses exploratoires des données en réalisant une analyse en composantes principales.

b- Analyse en Composantes Principales (ACP)

Dans le but de visualiser et d'analyser les corrélations existantes entre les différentes variables à travers leurs structurations et leurs orientations, d'identifier les principaux facteurs responsables de la qualité des eaux nous avons traité les données par l'Analyse en Composantes principales (ACP).

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse exploratoire des données : à partir d'une population d'individus caractérisés par un ensemble de variables quantitatives initiales, on cherche à structurer et à résumer les variables et les individus afin de mieux appréhender l'information apportée par les variables.

Cette méthode permet ainsi de déterminer des tendances, de repérer les variables les plus porteuses d'informations et de déterminer aussi des groupes d'individus homogènes.

L'objectif de l'ACP est de résumer les variables initiales à l'aide d'un petit nombre de variables synthétiques (les composantes principales) qui sont obtenus par combinaisons linéaires des variables initiales.

Définitions et notations :

L'ACP s'applique à des données quantitatives représentées sous la forme d'un tableau de données X à n lignes et p colonnes. Chaque ligne correspond à un individu (ou une observation) i , $i=1,2,\dots, n$ et chaque colonne à une variable quantitative (ou descripteur) X_j , $j=1,2,\dots, p$.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & \dots & X_{np} \end{bmatrix}$$

Calculs Préliminaires :

Pour commencer, le travail s'effectuera sur des données centrées et réduites : on calcule la moyenne et l'écart type de chaque variable, ensuite sur chaque observation on retire la moyenne et on divise par l'écart type pour obtenir la valeur centrée réduite correspondante.

La moyenne : $\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij}}{n}$

L'écart type : $\sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_{ij} - \bar{x})^2}{n}}$

La valeur centrée réduite : $\tilde{x} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}$

L'étape suivante consiste à calculer les différentes corrélations entre les variables afin d'obtenir la matrice dite de corrélations qui est obtenu de la manière suivantes :

$r_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{\tilde{x}_{ki} \times \tilde{x}_{kj}}{n}$ Avec k la nouvelle valeur des colonnes de la matrice

Cette matrice caractérise la forme du nuage des points individus.

Recherche des axes factoriels :

Maintenant nous nous intéressons aux axes factoriels, c'est-à-dire que nous regardons les directions d'allongement maximum du nuage de point. Cet allongement se traduit en terme d'inertie : chaque point A_i du nuage construit à partir de la matrice centrée réduite a pour coordonnées par rapport au centre de gravité G du nuage, les valeurs centrées réduites des variables, il est affecté d'une masse $1/N$ où N est le nombre d'observations. L'inertie totale par rapport au centre de gravité G est $In_G = \sum_1^N \frac{1}{N} G_{A_i}^2 = \text{trace}(\text{Corrélations})$

Nous allons chercher une base orthonormée (u_i) telle que l'inertie des projections des points du nuage sur chacun des axes soit maximum, c'est à dire que sur chacun des axes, la dispersion des projections du nuage de points est la plus grande possible.

La solution est le vecteur propre de la matrice de corrélations associé à la plus grande valeur propre. Les vecteurs propres de la matrice sont obtenus en diagonalisant la matrice.

Pour obtenir les valeurs propres λ , il faut d'abord obtenir le polynôme caractéristique de notre matrice et en trouver les racines qui vont être les valeurs propres de notre matrice.

Pour chaque valeur propre, il faut :

- Former la matrice $M = A - \lambda I$ (avec I la matrice identité) en soustrayant λ des termes diagonaux de A ;
- Trouver une base de l'espace des solutions du système homogène $M \cdot X = 0$. Les vecteurs de la base sont des vecteurs propres de A , linéairement indépendant et associés à λ .

Ensuite, on considère l'ensemble $S = (V_1, V_2, \dots, V_m)$ de tous les vecteurs obtenus lors des étapes précédentes. L'ensemble des vecteurs propres obtenus sont rassemblées dans une matrice que l'on nomme matrice de passage.

$D = P^{-1} \cdot X \cdot P = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix}$ où λ_i sont les valeurs propres associées aux vecteurs propres V_i .

Calcul des facteurs :

Les facteurs sur les lignes sont les vecteurs donnant pour chaque individu sa coordonnée sur l'axe factoriel correspondant. On construit ensuite le tableau des coordonnées factorielles des lignes qui correspond au produit matriciel $F_k = \text{Centrée_Réduite} * \text{Passage}$.

Dans un second temps, nous calculons les contributions des différentes lignes à l'inertie de chaque axe : $\text{CTR}_k = \frac{1}{N\lambda_k} \times F^2 k(i)$ où le coefficient $1/N$ représente le poids de la ligne.

Dans un troisième temps, un troisième tableau de données est calculé et qui nous donne les qualités de représentation (ou cosinus carrés). Chaque terme est égal au carré de la coordonnée divisé par la somme des carrés des quatre coordonnées.

Ensuite, nous calculons les coordonnées factorielles des colonnes qui sont liées à celles des lignes par les formules de transition.

Quelques règles d'interprétation d'une ACP :

Etude des variables : Une variable initiale est bien représentée dans un plan si elle se projette près du cercle unité (distance au centre ≥ 0.7). Les propriétés suivantes ne sont valables que pour des variables bien représentées.

Deux variables bien représentées et se projetant en des points voisins sont positivement corrélés. Si elles se projettent en des points diamétralement opposés, elles sont négativement corrélées.

Deux variables situées sur des droites orthogonales passant par le centre de gravité, sont indépendantes.

Etude des individus :

La qualité de représentation d'un individu dans un plan principal se juge par le cosinus carré de l'angle de l'individu avec le plan principal. Les règles suivantes ne s'appliquent qu'à des individus bien représentés ($\cos \alpha \geq 0.7$).

Deux individus se projetant en des points voisins ont les mêmes niveaux pour toutes les variables.

Deux individus se projetant en des points éloignés, différents par leurs niveaux sur au moins une variable.

Remarques importantes :

Dans le cas où l'on observe un individu totalement isolé, il convient de reprendre l'ACP sans cet individu.

Les oppositions les plus marquées entre les individus sont utiles pour interpréter les axes principaux.

Lorsque les données sont chronologiques, il est intéressant de suivre l'évolution des observations dans le plan principal.

L'examen des groupes d'individus peut mettre en évidence des facteurs utiles pour la compréhension des phénomènes.

II.5 Opération de terrain et prélèvement

Le prélèvement des échantillons est une opération capitale qui conditionne les résultats analytiques. Ainsi nos prélèvements ont été faits à l'aide d'une sonde dans les zones où l'écoulement de l'eau n'a subi aucune perturbation. Dans ces zones le courant est sensible et l'eau n'est pas stagnante. Nous avons effectué les prélèvements à une profondeur de 0,5 m au dessous du plan d'eau dans des bouteilles en plastique (flacons) préalablement nettoyées, rincées à l'eau distillée. Les prélèvements sont conservés et transportés dans des glacières puis déposés au laboratoire le même jour afin de s'assurer de leur stabilité. Le maintien des échantillons à basse température, 2 à 4°C, est une condition efficace pour éviter la modification de la composition des échantillons pouvant être causée par l'action des microorganismes indésirables et aux réactions chimiques.

Le prélèvement en profondeur évite d'échantillonner le film lipidique à l'interface eau-atmosphère, enrichi en contaminants atmosphériques et peu représentatif de la colonne d'eau sous-jacente. Pour chaque prélèvement, l'heure et la date du prélèvement sont notées sur des fiches et le code de la station est inscrit sur les flacons d'analyse.

Tous les prélèvements ont été réalisés dans de bonnes conditions atmosphériques.

II.6 Evolution des Systèmes d'évaluation de la qualité des cours d'eau SEQ-

Eau

La qualité des cours d'eau était évaluée en France (1971) à partir d'une grille multi usages qui associait, pour une série de paramètres physicochimiques et hydro biologiques des valeurs seuils à cinq classes de qualité représentées par des couleurs [100]. Cette grille permettait une évaluation sommaire de l'aptitude aux principaux usages et fonctions (Annexe 3). Ainsi, cinq

usages ont été retenus, dont un majeur, la production d'eau pour l'alimentation en eau potable (AEP) :

- production d'eau potable (AEP et industries agro-alimentaires),
- industrie (hors agro-alimentaire),
- énergie (pompes à chaleur, climatisation),
- irrigation,
- abreuvement.

Cette démarche permet d'appréhender la notion de degré d'anthropisation tout en prenant en compte les potentialités relatives aux divers usages et fonctions de l'eau. Les attentes recueillies de cette démarche permettront de comparer entre elles les eaux de l'ensemble du territoire et d'apprécier l'évolution de leur qualité.

Depuis 1999, les Agences de l'Eau (France) ont mis au point un outil, le SEQ-Eau, opérationnel qui permet entre autres d'évaluer la classe de qualité par altérations, chaque altération regroupant des paramètres de même nature ou de même effet. Les altérations permettent d'afficher les causes de dégradation de la qualité et les niveaux de qualité sont affichés pour chaque altération. Le SEQ-Eau définit 5 classes de qualité (Tableau II.2).

Pour chacune des altérations, la qualité de l'eau est décrite par un indice de qualité variant en continu de 0 (le pire) à 100 (le meilleur). Ce dernier permet de juger de l'évolution de la qualité de l'eau à l'intérieur d'une même classe sans qu'il y ait changement de classe, rendant l'évaluation plus précise [101].

Le système SEQ-Eau est employé à 2 niveaux :

- Pour l'étude de la qualité de l'eau des stations suivies dans le cadre des campagnes de caractérisation, sur la période d'étude. L'analyse est réalisée afin de déterminer la qualité globale de l'eau (biologique et physicochimique) de chacune des stations ;
- Pour l'étude d'impact environnemental des rejets chimiques liquides. Les valeurs limites pour les rejets chimiques liquides sont comparées en priorité aux valeurs du SEQ-Eau via l'aptitude « potentialité biologique », afin d'avoir une vision la plus fine possible de l'impact sur la biologie aquatique. Lorsqu'aucune valeur n'est définie pour la fonction « potentialités biologiques », la valeur du paramètre est comparée aux

valeurs de référence définies pour un autre usage (production d'eau) ou pour la définition des classes de qualité d'eau qui intègrent l'ensemble des fonctions et usages (approche globale).

Tableau II.2 Grille d'évaluation SEQ-Eau (Agence de l'Eau, 2009. Système d'Evaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau)

Classes de qualité	Code couleur	Indice de qualité
Très bonne		80 à 100
Bonne		60 à 79
Passable		40 à 59
Mauvaise		20 à 39
Très mauvaise		0 à 19

Bleu

Eau dont la composition est naturelle. Eau de très bonne qualité apte à satisfaire les usages les plus exigeants (eau potable)

vert

Eau de composition proche de l'état naturel, mais détection d'une contamination d'origine anthropique. Eau de bonne qualité, qui peut néanmoins satisfaire tous les usages. L'abreuvement des animaux est toléré. La baignade est possible, si les contacts avec l'eau sont de courte durée.

jaune

Dégradation significative par rapport à l'état naturel. Eau de qualité moyenne suffisante pour l'irrigation, les usages industriels et la production d'eau potable après un traitement poussé.

orange

Dégradation importante par rapport à l'état naturel. Eau de qualité médiocre, juste apte à l'irrigation.

rouge

Dégradation très importante par rapport à l'état naturel. Eau de mauvaise qualité inapte à la plupart des usages. Elle peut constituer une menace pour la santé publique et l'environnement

MATIERES ORGANIQUES ET OXYDABLES

	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Oxygène dissous (mg/l)	8	6	4	3	
Taux de saturation en oxygène (%)	90	70	50	30	
DCO (mg/l O ₂)	20	30	40	80	
DBO (mg/l O ₂)	3	6	10	25	
Oxydabilité au KMnO ₄ (mg/l O ₂)	3	5	8	10	
Ammonium (mg/l)	0,5	1,5	2,8	6	
Azote Kjeldahl (mg/l)	1	2	4	6	

NITRATE et NITRITE

	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Nitrate (mg/l)	2	10	25	50	
Nitrite (mg/l)	0,03	0,1	0,5	1	

MATIERES PHOSPHATE

	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Phosphore total (mg/l)	0,05	0,2	0,5	1	
Phosphate (mg/l)	0,1	0,5	1	2	

PARTICULES EN SUSPENSION

	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
MES (mg/l)	25	50	100	150	
Turbidité (NTU)	15	35	70	105	
Transparence SECCHI (m)	2	1	0,5	0,25	

MINERALISATION (qualité globale)

	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Conductivité (µS/cm)	2500	3000	3500	4000	
Chlorure (mg/l)	62,5	125	190	250	
Sulfate (mg/l)	62,5	125	190	250	
Calcium (mg/l) min.	24	18	12		
max.	160	230	300	500	
Magnésium (mg/l)	50	75	100	400	
Sodium (mg/l)	200	225	250	750	
Potassium (mg/l)	12	13,5	15	70	
TA, TAC (d°F) min.	6	4,5	3		
max.	40	58	75	100	
Dureté (°F) min.	8	6	4		
max.	50	70	90	125	

MICROPOLLUANTS MINERAUX SUR EAUX BRUTE

(Dureté moyenne 5<TH<20°F ou 50<CaCO₃<200 mg/l)

	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Cadmium (µg/l)	0,004	0,04	0,37	1,3	
Plomb (µg/l)	0,18	1,8	18	350	

Cuivre (µg/l)	0,1	1	10	15	
Nickel (µg/l)	0,62	6,2	62	360	
Chrome (µg/l)	0,52	5,2	52	250	
Zinc (µg/l)	0,43	4,3	43	98	

II.7 Les différents usages de l'eau

La consommation de l'eau se répartit selon des domaines : l'eau domestique, l'eau à usage agricole et l'eau industrielle. La qualité requise et les traitements mis en œuvre pour l'obtenir diffèrent selon les usages :

- l'eau à usage domestique nécessite une très grande quantité car elle doit satisfaire les besoins des organismes humains et les exigences correspondantes en matière d'hygiène et de santé. Une eau potable doit être exempte de germes pathogènes, comme des virus, des bactéries et d'autres organismes parasites. Elle ne doit pas non plus contenir certaines substances minérales considérées comme toxiques, tels les nitrates, les phosphates et les métaux lourds, ni des composés organiques comme les hydrocarbures et les pesticides. A l'inverse, la présence de certaines substances, comme les oligo-éléments peut-être vivement souhaitée car considérées comme indispensables à l'organisme humain.
- L'eau pour l'irrigation. L'irrigation est mise à profit pour stimuler la production agricole. Pour permettre leur croissance végétale et leur développement, les plantes ont besoin d'eau appropriée en quantité et en qualité. En effet, l'eau remplit différentes fonctions dans le développement des couverts végétaux. En premier lieu, elle est le milieu dans lequel se développent les organismes vivants et notamment la végétation. Les plantes cultivées prélèvent les éléments minéraux nécessaires à leur métabolismes sous forme dissoute dans la solution en équilibre physicochimique avec la matrice organo-minérale du sol. Certains éléments de l'eau d'irrigation peuvent être directement toxiques à la culture. Il faut alors éviter d'utiliser des eaux d'irrigation susceptibles d'être polluées accidentellement par des activités humaines.
- Eau à usage industriel répond à 3 types de demandes distinctes :
 - L'utilisation de l'eau comme matière première, essentiellement dans les industries alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques ;
 - L'utilisation de l'eau comme fluide de refroidissement pouvant engendrer, par une élévation de température au niveau des rejets, une pollution thermique susceptible de perturber les écosystèmes ;

- L'utilisation de l'eau, pour ses bonnes propriétés de solvant, comme agent de nettoyage.
- Eau à usage abreuvement des animaux. L'usage abreuvement exprime l'aptitude de l'eau à permettre l'abreuvement des animaux d'élevage. Le risque principal est le risque microbiologique. Cependant l'on ne peut pas sous estimer le risque chimique du aux matières phosphorées, les matières azotées et aux polluants issus des industries et des hôpitaux.

CHAPITRE 3

RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1- Caractérisation des eaux du fleuve Chari

Les résultats des analyses par spectrométrie HACH DR 2400 sont représentés dans le tableau III.1. Dans ce tableau sont rassemblées les valeurs moyennes des paramètres physicochimiques sur toutes les mesures des différentes campagnes.

Tableau III.1 : Valeurs moyennes des paramètres mesurés par photométrie DR 2400.

	T(°C)	pH	Cond. μS/cm	Turb. NTU	Zn mg/l	Cu mg/l	Cr mg/l	Mn mg/l	Ni mg/l	Fe mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	PO ₄ ³⁻ mg/l
PDV	27,61	7,95	34,15	84,83	0,19	0,10	0,03	0,26	0,09	1,50	0,01	0,01	31,95	3,10
BRAM	28,50	7,70	34,30	62,20	0,08	0,07	0,03	0,30	0,10	1,40	ND	0,04	14,50	3,90
BREX	28,50	8,14	61,50	92,78	0,20	0,10	0,04	0,30	0,15	1,60	0,04	0,04	38,60	3,32
BRAV	27,00	7,90	40,80	65,50	0,10	0,14	0,02	0,30	0,10	1,50	0,02	0,03	23,90	4,40
CSTAM	28,8	7,95	14,05	18,80	0,20	0,10	0,04	0,40	0,20	0,90	ND	0,03	23,20	5,20
CSTEX	27,65	7,03	47,25	88,48	0,13	0,13	0,11	0,30	0,30	1,10	ND	0,05	33,22	3,00
CSTAV	28,60	7,25	13,90	17,10	0,20	0,09	0,04	0,40	0,45	0,96	ND	0,04	22,40	6,24
ABAM	27,10	7,40	30,80	56,40	0,12	0,11	0,03	0,30	0,60	1,60	0,04	0,05	21,60	4,40
ABEX	29,11	7,47	52,65	117,01	0,13	0,1	0,03	0,30	0,50	1,90	0,03	0,04	58,48	3,98
ABAV	29,14	7,48	39,90	91,56	0,13	0,17	0,03	0,50	0,55	1,50	0,04	0,04	46,02	3,75

Le tableau III.2 présente les résultats des valeurs moyennes obtenues par chromatographie ionique sur toutes les mesures des différentes campagnes.

Tableau III.2 Valeurs moyennes des anions mesurés par chromatographie ionique (CI)

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻
PDV	9,90	16,00	14,85
BRAM	11,08	7,97	5,00
BREX	15,41	13,71	10,00
BRAV	15,05	9,31	6,51
CSTAM	6,05	9,58	6,80
CSTEX	24,85	7,87	8,50
CSTAV	13,74	8,19	6,40
ABAM	25,70	11,95	5,70
ABEX	23,70	8,65	5,20
ABAV	16,95	12,50	5,55

La grille permet une évaluation sommaire de l'aptitude aux principaux usages et fonctions. Pour chacun des paramètres physicochimiques décrivant une altération relative à un usage

donné, il est déterminé un certain nombre de valeurs seuils permettant de définir différents niveaux d'aptitude de l'eau à satisfaire ces usages, et d'exprimer la dégradation de l'eau par rapport à l'état patrimonial. Le tableau III.3 présente le positionnement des résultats moyens obtenus pour les eaux du Chari sur cette grille

Tableau III.3 Position des moyennes des paramètres mesurés dans les grilles multi-usages

Paramètres	Classes				
	1A	1B	2	3	Hors classe
T (°C)				x	
pH		x			
Cond.(µS/cm)					
Turb. (NTU)				x	
DCO (mg/l)			x		
DBO5 (mg/l)				x	
Oxygène dissous (mg/l)		x			
Cd (mg/l)				x	
Pb (mg/l)				x	
Zn (mg/l)	x		x		
Cu (mg/l)	x				
Cr (mg/l)			x		
Mn (mg/l)			x		
Ni (mg/l)				x	
Fe (mg/l)				x	
Cl ⁻ (mg/l)					
SO ₄ ²⁻ (mg/l)					
F ⁻ (mg/l)					x
NO ₃ ⁻ (mg/l)				x	
PO ₄ ³⁻ (mg/l)				x	

III.2- Paramètres physicochimiques

III.2.1- Variation spatiale des paramètres

a- Température

Le régime thermique des eaux du Chari suit celui du climat des saisons : élevé pendant la saison sèche (>30°C) et la saison des pluies. Les mois de décembre et janvier sont les périodes fraîches. Une homogénéité est constatée d'une saison à l'autre au niveau des eaux du Chari (figure 3.1). Les résultats du tableau III.1 montrent que la moyenne des températures varie entre 27°C et 29,14°C. On note de petites variations des températures d'une amplitude d'environ 4°C passant d'environ 27°C en temps sec à environ 31°C en temps pluvieux. Ces variations peuvent entraîner des perturbations dans l'équilibre de l'écosystème aquatique [104]. Par exemple, les températures élevées facilitent les réactions d'oxydation des dérivés

de l'azote (NH_4^+ , NO_2^-) et, par conséquent, entraîne une diminution du taux d'oxygène dissous [105]. Un des facteurs de la variation de température est l'industrie qui utilise l'eau comme fluide réfrigérant. La valeur moyenne obtenue ($26,8^\circ\text{C}$) appartient à la classe 3 des grilles multi-usages (Annexe 3).

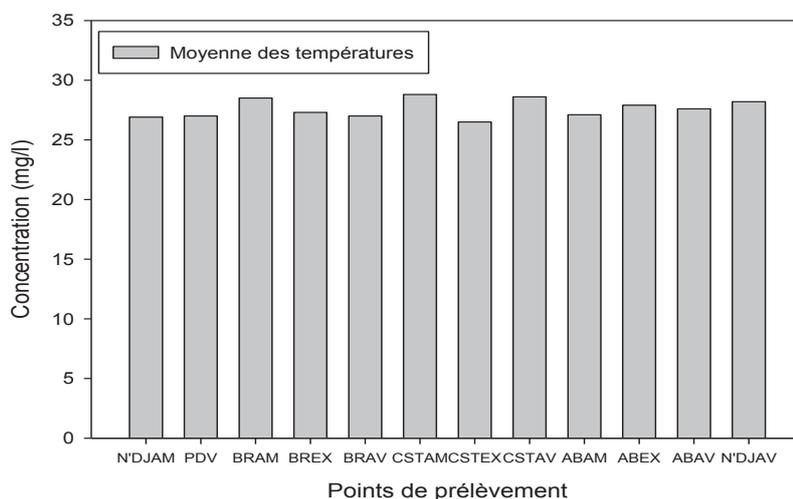


Figure 3.1 Température moyenne de l'eau du Chari

b- pH

Les résultats du tableau III.1 montrent que les valeurs moyennes de pH des eaux oscillent entre 7,03 à 8,14. La moyenne de ces valeurs est comparable à celles relevées sur la Sankarani à Selingué (7,06) et sur le Niger à Ségou (8,75) (Camail et *al.*, 1987) [106]. Les données d'octobre 2008 ont indiqué des pH acide (6,88) mais proches de la neutralité. Au niveau des exutoires des industries, la moyenne des pH reste élevée à certains endroits (figure 3.2). Les eaux provenant des brasseries (BREX) ont une forte alcalinité de sorte que le pH atteint 9,86 en mars 2008 et 9,95 en janvier 2009. Ces valeurs mesurées sont très supérieures à la valeur limite (8,5) fixée par l'OMS [9]. Cette forte alcalinité serait liée à l'utilisation abusive en produit de nettoyage. Une amplitude élevée de pH, comme celle de BREX, est préjudiciable à l'environnement. Elle peut avoir une conséquence néfaste pour la faune et la flore aquatique dont le pH de croissance se situe entre 6,5 et 8,5 [107].

Lorsqu'on oriente l'étude suivant l'écoulement de l'eau, la tendance est à la diminution du pH. Cette diminution pourrait s'expliquer par la qualité des décharges des eaux usées riches en acide humique.

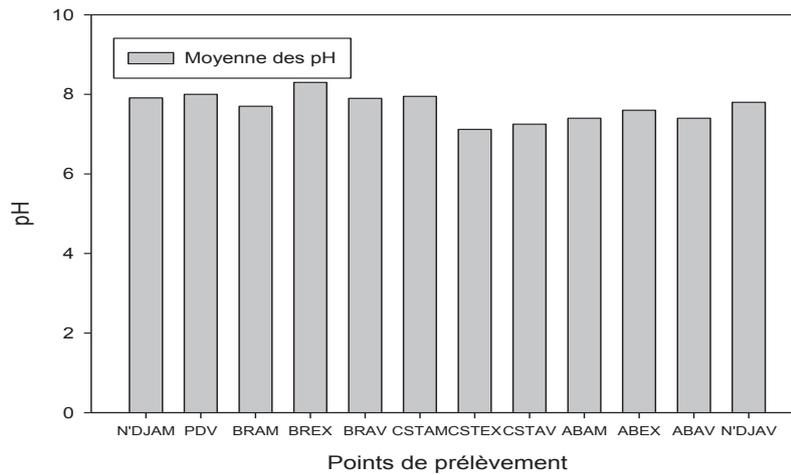


Figure. 3.2 Les valeurs moyennes de pH des eaux du Chari

La valeur moyenne de 7,5 obtenue le long du cours d'eau semble confirmer les remarques de Rodier [85] selon lesquelles, à cause du pouvoir tampon de l'eau, c'est-à-dire son aptitude à s'opposer à toute variation de son pH, il est rare, sauf dans les cas des rejets (comme les rejets aux points BREX et BRAV), que le pH s'écarte de l'intervalle 6,5-8,5. La valeur moyenne appartient à la classe 1B de la grille multi-usages (Annexe 3). Les eaux du Chari sont caractérisées par un pH légèrement alcalin et qui varie selon les lieux de prélèvement.

c- Conductivité électrique

La mesure de la conductivité permet d'évaluer globalement la minéralisation de l'eau. Le tableau III.1 montre les valeurs moyennes de la conductivité des eaux et qui sont comprises entre 34,15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 61,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Il ressort de ces données que la minéralisation des eaux du Chari est très faible car les conductivités mesurées sont inférieures à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figure 3.3). On a observé que les prélèvements en juillet 2009 ont montré une conductivité supérieure aux autres prélèvements ; on a enregistré respectivement aux points BREX et ABEX les valeurs 130,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 98,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette augmentation proviendrait des eaux riches en ions apportés par le lessivage des pluies. Les valeurs des conductivités mesurées sont très inférieures à la valeur limite 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ fixée par l'OMS. Les moyennes des valeurs mesurées sont comparables à celles du fleuve Congo (33 $\mu\text{S}/\text{cm}$) [108]. D'une façon générale, les résultats montrent que la conductivité s'élève progressivement de l'amont à l'aval.

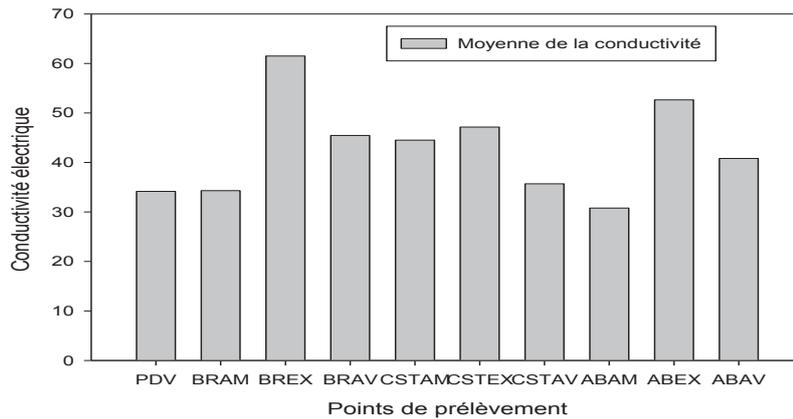


Figure 3.3 Conductivité moyenne ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux du Chari

d- Turbidité

Les valeurs moyennes de la turbidité des eaux des différents points de prélèvement sont comprises entre 17,10 NTU et 117,01 NTU (Tableau III.1). Il s’ensuit que les eaux du Chari sont troubles. Cette turbidité est fonction des saisons et des périodes de prélèvement. On a observé une forte turbidité des eaux prélevées en juillet (206 à 261 NTU) et en septembre 2009 (92,2 à 116 NTU), ce qui correspond donc à la saison des pluies où l’augmentation de la turbidité résulte du phénomène de ruissellement des eaux de pluies et celui de la remise en suspension des sédiments déposés antérieurement dans le fleuve. Les valeurs moyennes mesurées aux points de prélèvement sont très supérieures à la valeur référence de qualité (2 NTU) [9]. La turbidité empêche la propagation de la lumière, et de ce fait limite la photosynthèse. La valeur moyenne de la turbidité appartient à la classe 3 de la grille multi-usage (Annexe 3).

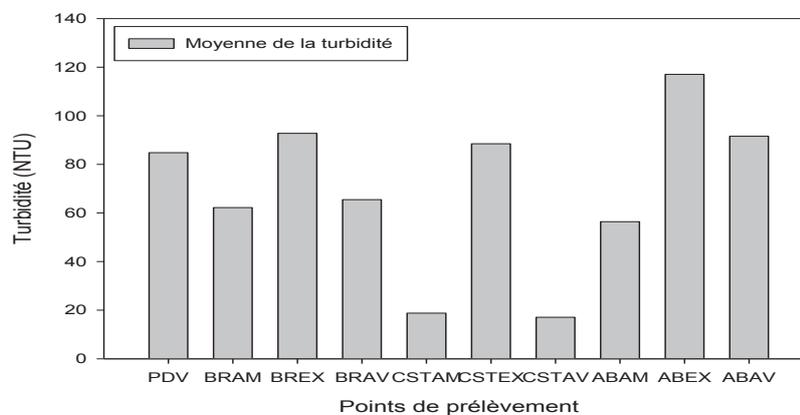


Figure 3.4 Moyennes de turbidité des eaux du Chari

e- Oxygène dissous

La solubilité de l'oxygène étant fonction de la température et de la pression partielle, les résultats montrent des teneurs en oxygène régulières et satisfaisantes. Les teneurs en oxygène dissous se situent entre 5,97 et 7,97 mg/l (figure 3.5).

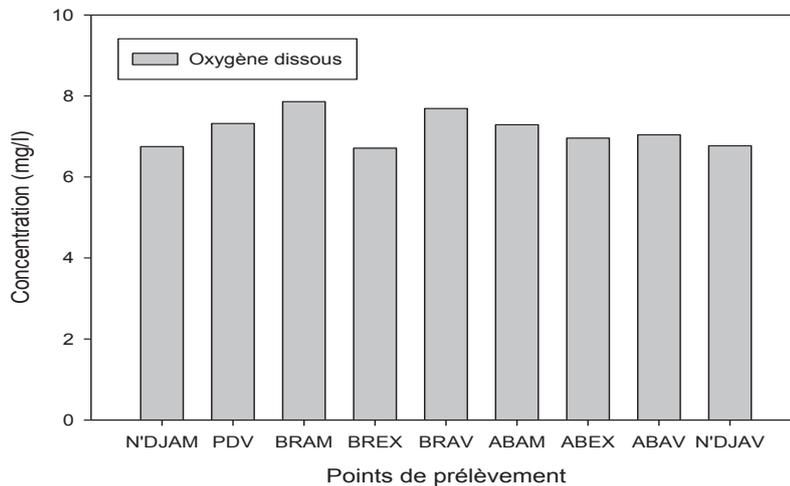


Figure 3.5 Teneurs moyennes en oxygène dissous

A plus de trois mètres de profondeur, la concentration de l'oxygène dissous est supérieure à 5 mg/l (Tableau III.4).

Tableau III.4 Valeurs de l'oxygène dissous mesurées suivant les profondeurs du Chari en amont (NDJAM) et en aval (NDJAV) de N'Djamena

Temps sec		Temps pluvieux	
N'DJAM	Oxygène dissous (mg/l)	N'DJAM	Oxygène dissous (mg/l)
1m	6,03	1m	6,23
2m	5,92	2m	6,14
3m	5,87	3m	6,11
		4m	6,10
N'DJAV		N'DJAV	
1m	5,97	1m	6,08
2m	5,83	2m	6,09
3m	5,81	3m	6,03
		4m	5,97

Ces résultats n'expriment pas une forte pollution organique du fleuve Chari. On observe par contre une diminution progressive de l'oxygène dissous de l'amont en aval de la ville. Plusieurs phénomènes permettent d'expliquer cette diminution : l'augmentation pendant la journée de la température, les mouvements de l'eau qui engendrent un brassage continu des

eaux usées et par conséquent un enrichissement en la matière organique. En amont (N'DJAM), la perturbation due à un déversement des eaux usées pouvant contribuer à la diminution de l'oxygène dissous est insignifiante, c'est pourquoi l'eau y est aérée et proche de la saturation en oxygène. En aval (N'DJAV), la diminution de la teneur en oxygène est significative. Les prélèvements à cet endroit s'opèrent sous le soleil où la température de l'eau est élevée. Il y a des déversements continus des eaux usées qui peuvent accuser une chute de l'oxygène dissous. Les teneurs en oxygène d'une manière générale se maintiennent à des valeurs supérieures à 5 mg/l, ce qui est bon pour l'écosystème [108]. La moyenne de l'oxygène dissous appartient à la classe 1B des grilles multi-usages (Annexe 3). Les valeurs de ce paramètre se rapprochent des normes de potabilité tout en restant inférieure.

f- DBO₅ et DCO

La DBO₅ et la DCO sont toujours plus élevées par temps de pluie du fait des eaux de ruissellement qui entraînent de nombreuses matières organiques. Dans le tableau III.5 ci-dessous sont rassemblées les moyennes en DBO₅ et en DCO aux points N'DJAM, BREX, CSTEX, ABEX et N'DJAV.

Tableau III.5 Moyennes en DBO₅ et en DCO (mg/l)

Paramètres	N'DJAM	PDV	BREX	CSTEX	ABEX	ABAV	N'DJAV
DBO₅	6,20	6,00	12,25	9,95	17,15	16,75	8,9
DCO	10,87	11,45	16,50	19,40	30,75	30,5	25,43

Les données de la DBO₅ montrent que les eaux du Chari sont polluées (5 à 10 mg O₂/l). En effet, les eaux de surface destinées à la consommation humaine ne doivent pas dépasser 5 mg/l de DBO₅ à 20°C [107]. D'après la figure 3.6, l'eau est à forte DBO₅, (6 à 16 mg/l). On note aussi une augmentation de la DBO₅ de l'amont vers l'aval. On atteint 22 mg/l en aval de N'Djamena (N'DJAV). Ceci peut être expliqué par la charge en matière organique de l'eau. Cette moyenne obtenue place les eaux du Chari dans la classe 3 des grilles multi-usages (Annexe 3). Les valeurs moyennes de la DBO₅ correspondent à la nécessité de faire subir un traitement correctif à l'eau pour la rendre conforme aux normes de potabilité avant sa consommation. Les valeurs moyennes de DCO pour toutes les eaux étudiées permettent de classer ces eaux parmi celle de qualité moyenne (pollution nette) (figure 3.7), car la valeur la plus élevée atteinte est 42,2 mg/l. Cette valeur obtenue appartient à la classe 3 des grilles multi-usages (Annexe 3), c'est-à-dire celle des eaux de « classe médiocre ». Les eaux de

surface destinées à la consommation humaine ne doivent pas dépasser 25 mg/l de DCO à 20°C [109].

Le rapport DCO/DBO5 qui donne une approximation de la biodégradabilité de la matière organique d'un effluent donné. Pour le Chari, ce rapport se situe entre 1,6 et 2,4. Ce qui montre que les eaux du Chari sont facilement biodégradables.

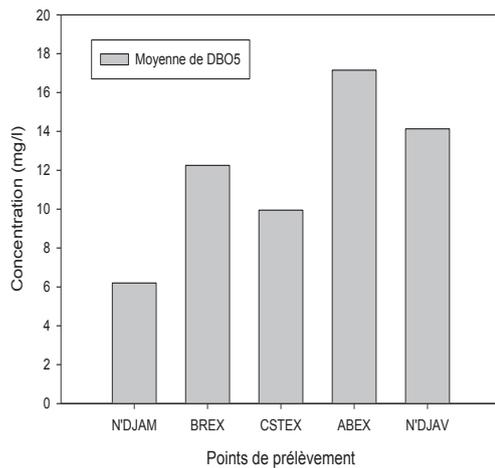


Figure 3.6 Teneur moyenne en DBO5

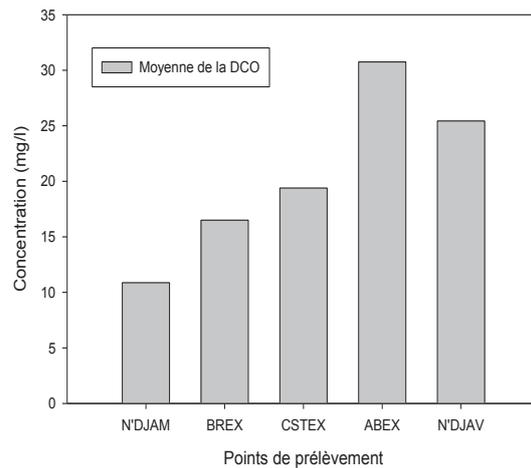


Figure 3.7 Teneur moyenne en DCO

g- Nitrates

Les résultats des analyses des nitrates montrent que leurs teneurs moyennes oscillent entre 21,60 mg/l et 58,48 mg/l (Tableau III.1). Les valeurs les plus élevées ont été observées lors du prélèvement de septembre 2009 ; la teneur en nitrate varie de 42 mg/l (amont) à 66 mg/l (aval) de la ville (figure 3.8). Les points de mesure qui ont montré des valeurs moyennes élevées sont les exutoires des brasseries et des abattoirs (BREX et ABEX). Nous constatons que la concentration des eaux du Chari en nitrate augmente de manière significative de l'amont en aval de la ville (figure 3.8). Ces teneurs moyennes en nitrates sont supérieures à la valeur limite de la ligne directrice fixée par l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable (50 mg/l) [9]. La concentration élevée en nitrate pourrait aussi être attribuée aux rejets provenant des produits d'élevage, à l'utilisation excessive de fertilisants employés en agriculture et aux eaux usées déversées dans le fleuve sans aucun traitement préalable. Sans apport extérieur, les eaux de surface ne contiennent pas plus de 10 mg/l de nitrate [86]. Ici encore, nous pouvons

dire qu'il s'agit d'une pollution importante qui place les eaux du Chari dans la classe 3 des grilles multi-usages (Annexe 3).

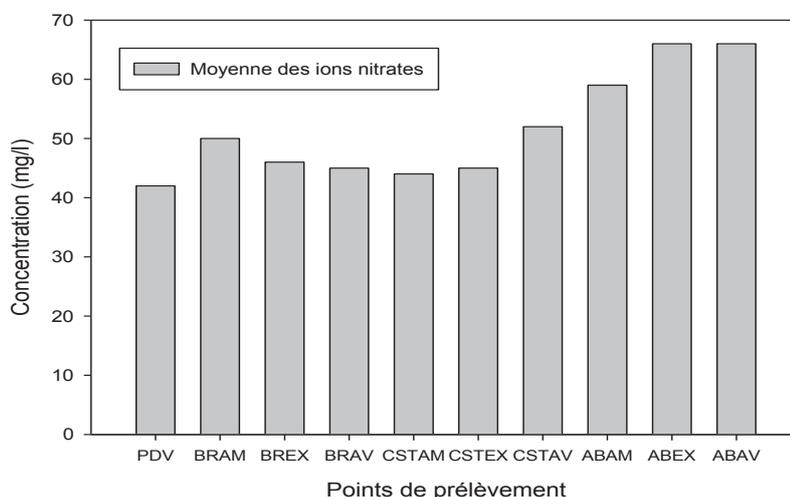


Figure 3.8 Teneur moyenne en nitrate

h- Phosphates

Les valeurs en phosphate dans des différents points de prélèvement sont comprises entre 3,10 mg/l et 6,24 mg/l (Tableau III.1). Les teneurs en phosphate constatées sont en moyenne de 5 mg/l. Les teneurs au point ABEX varient entre 5,65 mg/l et 7,9 mg/l. L'ensemble des campagnes d'analyse révèle des teneurs élevées en matières phosphorées. Cependant, les prélèvements en 2008 ont enregistré des teneurs plus élevées que les autres prélèvements des autres années. Nous constatons que les moyennes des concentrations des eaux du Chari en phosphate augmentent de manière significative de l'amont en aval de la ville. Ces valeurs sont supérieures à la valeur guide 0,7 mg/l [9] (figure 3.9). Dans les eaux de surface, la teneur naturelle en phosphate devrait être de l'ordre 0,1 mg/l. Le rejet des eaux domestiques et industrielles ainsi que le drainage des terres agricoles fertilisées (apport d'engrais) contribuent à en augmenter la concentration. Les teneurs relevées en phosphate sont certainement liés à l'activité humaine et pourrait provenir de rejet d'eaux usées domestiques ou du lessivage des engrais. Le phosphore est un élément nutritif essentiel à la croissance des plantes. L'excès du phosphate dans l'eau peut favoriser la prolifération d'algues et contribuer à un vaste éventail de problèmes liés à la qualité de l'eau. La valeur obtenue pour ce paramètre (7,5 mg/l) est une valeur de la classe 3 (Annexe 3).

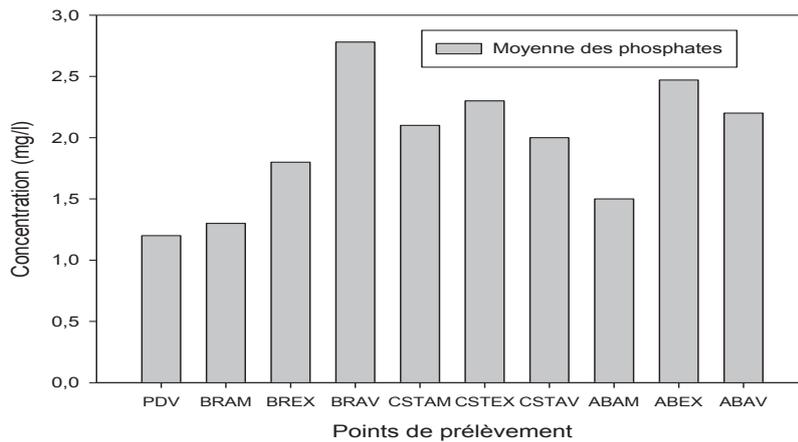


Figure 3.9 Teneur moyenne en phosphate

i- Sulfates

Les moyennes varient entre 7,87 et 16,00 mg/l (Tableau III.2). Les teneurs moyennes de ce paramètre dans les eaux étudiées sont très variables d'un point de prélèvement à l'autre. Les seuls points de mesures qui ont montré les valeurs moyennes élevées sont PDV (31 mg/l) et ABAV (24 mg/l), pendant la campagne de janvier 2009. Nous constatons que les moyennes des concentrations des eaux du Chari en sulfate augmentent de manière significative de l'amont en aval de la ville. Nous pensons que cela est peut être dû à la décantation ou à de complexation éventuelle des sulfates le long du trajet de l'écoulement des eaux. Les teneurs moyennes en sulfate sont très inférieures à la valeur limite [9] et celle fixée par l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable (500 mg/l). Les moyennes de ce paramètre placent les eaux du Chari dans la classe 1A des grilles multi-usages (Annexe 3).

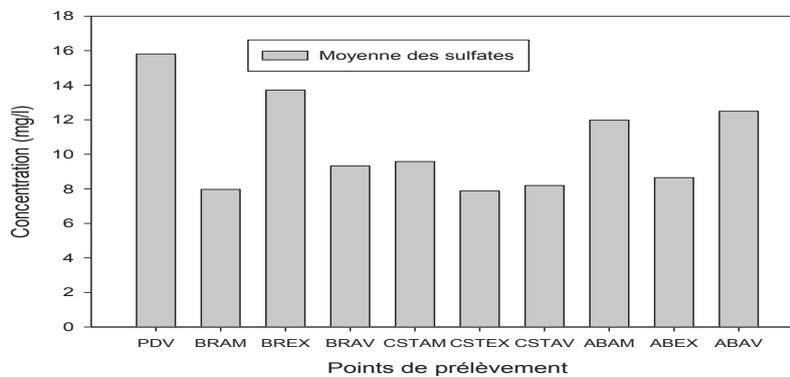


Figure 3.10. Teneur moyenne en sulfate

j- Fluorures

L'analyse des résultats montre que la moyenne des concentrations en fluorures enregistrées est de 7,40 mg/l. Les valeurs de ce paramètre dans les eaux étudiées sont très variables et oscillent entre 1,50 et 14,85 mg/l (Tableau III.2). La moyenne de ces valeurs est très supérieure à la valeur limite et référence des eaux françaises destinées à la consommation humaine [9] et celle fixée par l'OMS (1,5 mg/l). La concentration en ion fluorure est importante dans les eaux du Chari. Cette concentration élevée pourrait être attribuée aux eaux usées provenant des usines et des fertilisants agricoles. La consommation régulière d'une eau de concentration en ion fluorure entre 2 et 4 mg/l par un enfant de moins de 6 ans entraîne inéluctablement une fluorose dentaire qui se traduit par des dents marbrées [109].

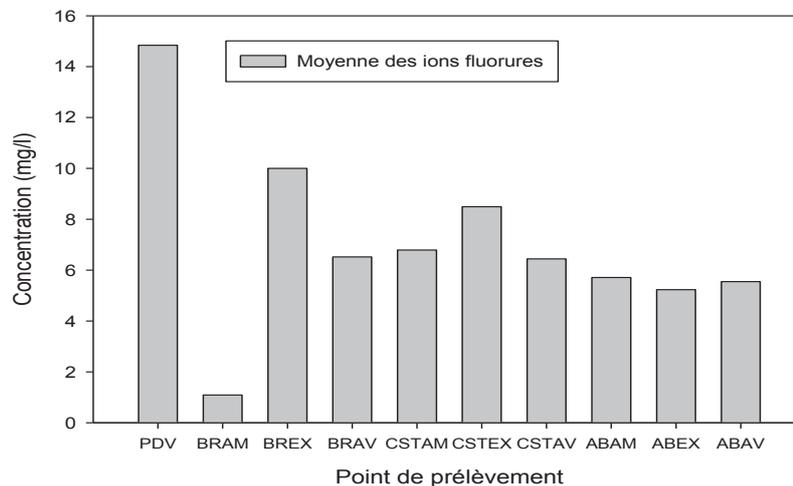


Figure 3.11. Teneur moyenne en fluorure

k- Chlorure

Les teneurs moyennes de ce paramètre dans les eaux étudiées sont très variables et faibles. Elles oscillent entre 6,05 et 25,70 mg/l (Tableau III.2). Ces valeurs sont très inférieures à la valeur limite impérative 200 mg/l [9]. L'ion chlorure est un paramètre chimique lié à la structure naturelle des eaux. Sa présence dans les eaux du Chari est aussi liée au lessivage des roches et des sols sédimentaires, de la désinfection des eaux domestiques et des procédés industriels qui emploient le chlore comme agent de blanchiment (CSTEM et ABEX). Les moyennes de ce paramètre placent les eaux du Chari dans la classe 1A des grilles multi-usages (Annexe 3)

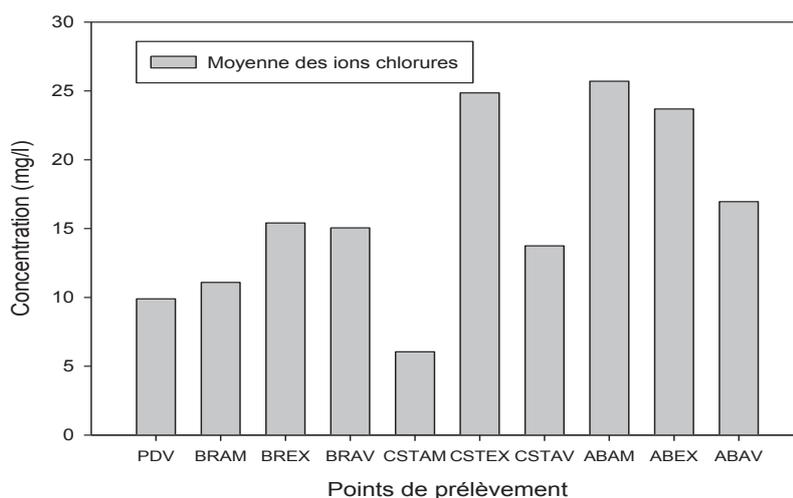


Figure 3.12. Teneur moyenne en chlorure

1- Le zinc

Les teneurs moyennes en zinc sont comprises entre 0,08 mg/l et 0,20 mg/l (Tableau III.1). Le maximum des concentrations est enregistré aux points PDV, BREX, CSTAM et CSTAV. Ces concentrations sont supérieures à la moyenne des eaux du fleuve Niger (0,023 mg/l à Koulikoro et 0,12 mg/l à Bamako) [110]. Les fortes charges des eaux usées déversées en ces points expliquent ce résultat. Les points BRAM et BRAV enregistrent les moyennes les plus basses qui sont respectivement de 0,08 et 0,1 mg/l. Les moyennes des concentrations en zinc mesurées sont acceptables dans les limites et références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Dans les eaux douces superficielles destinées à la consommation humaines, la réglementation française recommande 1mg/l comme valeur limite impérative selon l'Arrêté publié au journal officiel du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine. Ceci place le zinc dans la classe 1A (Annexe 3). La figure 3.13 montre la moyenne des concentrations en zinc.

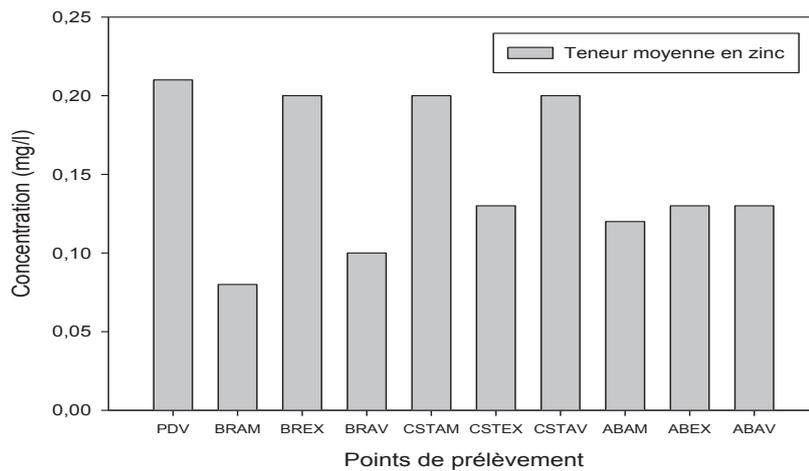


Figure 3.13 Teneur moyenne en zinc

m- Le cuivre

Les résultats du tableau III.1 montrent que les valeurs trouvées en cuivre sont très peu variables d'un point à l'autre. Les concentrations moyennes de cuivre par point de prélèvement sont comprises entre 0,07 et 0,17 mg/l. Les plus fortes concentrations sont enregistrées aux points BRAV et ABAV et la plus faible au point BRAM. Ces concentrations sont légèrement inférieures à la moyenne des eaux du fleuve Niger (0,033 mg/l à Koulikoro et 0,41 mg/l à Bamako) [110]. Ces valeurs sont légèrement supérieures à la valeur limite de qualité de la réglementation française et celle de l'OMS (2 mg/l). Ce qui place le cuivre dans la classe 1A les eaux du Chari (Annexe 3). D'une façon générale, ces résultats montrent que les moyennes des concentrations s'élèvent progressivement de l'amont à l'aval. La figure 3.14 montre la moyenne des concentrations en cuivre, par point de prélèvement, mesurées.

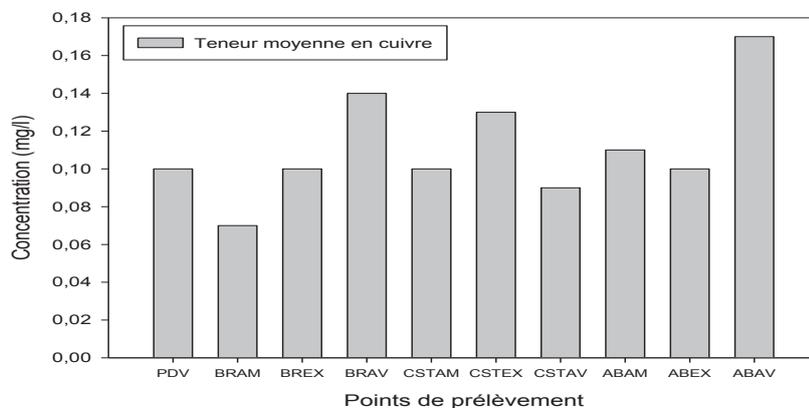


Figure 3.14 Teneur moyenne en cuivre

n- Le chrome

Le chrome est l'un des éléments dont la teneur est faible dans les eaux du Chari. Les concentrations moyennes en chrome sont comprises entre 0,02 et 0,11 mg/l (Tableau III.1). CSTEMEX a enregistré la teneur moyenne la plus forte 0,11 mg/l. Les moyennes des concentrations mesurées sont inférieures à celles des eaux du fleuve Niger (1,10 mg/l à Bamako) [110]. PDV et BRAV ont enregistré la teneur moyenne la plus basse 0,02 mg/l. L'ensemble des concentrations moyennes en chrome est inférieur à la valeur limite de qualité fixée par l'OMS (0,05 mg/l). Sauf la moyenne enregistrée au point CSTEMEX montre un excès de pollution (figure 3.15). Tout ceci place le chrome dans la classe 1A des grilles multi-usage la qualité des eaux du Chari (Annexe 3). La présence naturelle du chrome, à l'état de cation, dans l'eau de surface n'est sensible que lorsque le pH est bas. Les eaux douces superficielles n'en contiennent que de faibles quantités (de 5 à 10 µg/l). Le chrome est plus souvent lié à des rejets d'eaux usées ou à des infiltrations par des champs d'épandage de boues de stations d'épuration. D'une façon générale, les résultats montrent que les moyennes des concentrations s'élèvent progressivement de l'amont à l'aval.

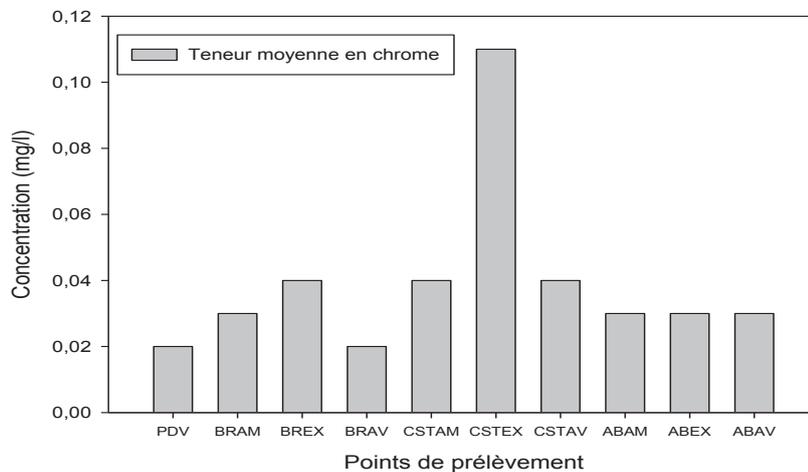


Figure 3.15 Teneur moyenne en chrome

o- Le manganèse

Le tableau III.1 montre que les concentrations moyennes en manganèse sont élevées dans les eaux du Chari. Elles varient de 0,26 à 0,5 mg/l. Cette présence du manganèse dans l'eau ne semble pas être liée seulement aux rejets domestiques ou industriels car il est assez répandu dans la nature et s'emploie dans de nombreuses applications industrielles (métallurgie,

industrie électrique, industrie chimique, industrie de verre et de la céramique, carburant). Ces valeurs sont supérieures à la valeur de la ligne directive de l’OMS en ce qui concerne la qualité de l’eau potable (0,05 mg/l). Ce qui place le manganèse dans la classe 3 des grilles multi-usages (Annexe 3). D’une façon générale, les résultats montrent que les moyennes des concentrations s’élèvent progressivement de l’amont à l’aval (figure 3.16).

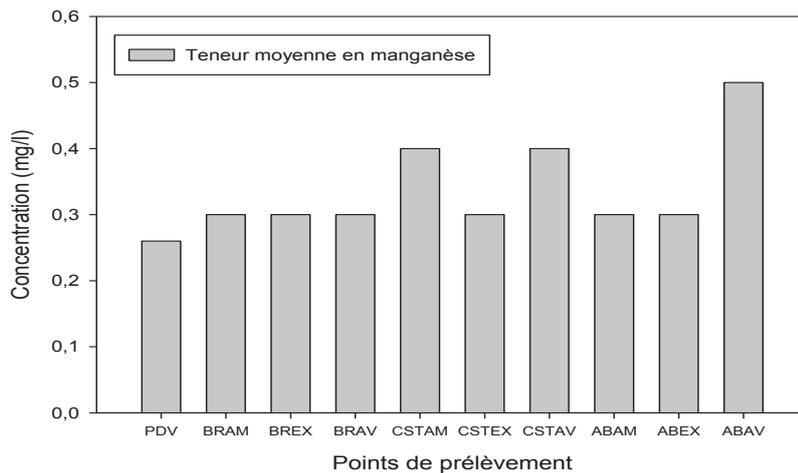


Figure 3.16 Teneur moyenne en manganèse

p- Le nickel

Les teneurs moyennes en nickel varient entre 0,09 mg/l (PDV) et 0,90 mg/l (ABAM) (Tableau III.1). Ces valeurs sont supérieures à la valeur de la ligne directive fixée par l’OMS (0,07 mg/l). Les teneurs moyennes au point CSTAV sont cinq fois plus élevées que la moyenne des teneurs relevées dans les autres points (figure 3.17). Ce site est l’un des points indicateurs des apports excessifs en nickel. Il pourrait avoir une pollution ponctuelle en ce point. Ces concentrations sont supérieures à la moyenne des eaux du fleuve Niger (0,1 mg/l à Bamako) [110]. Les teneurs moyennes place le nickel dans la classe 3 (Annexe 3).

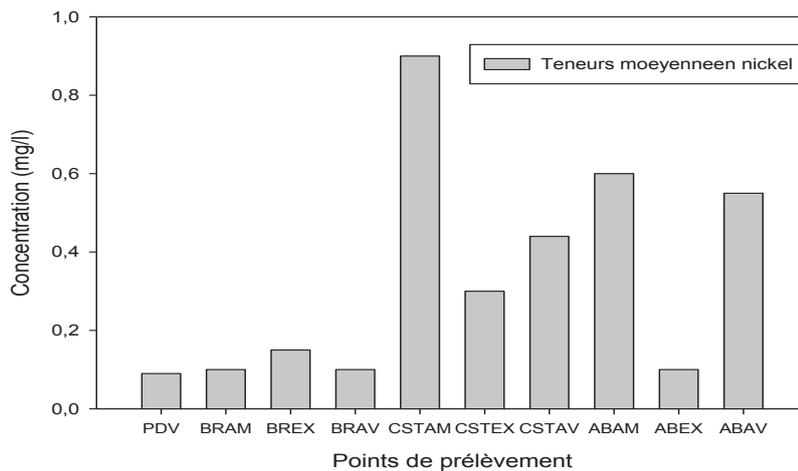


Figure 3.17 Teneur moyenne en nickel

q- Le fer

Le fer est l'élément le plus abondant dans les eaux du Chari. Les teneurs moyennes en fer sont comprises entre 0,90 et 1,90 mg/l (Tableau III.1). Les plus fortes concentrations sont enregistrées pendant les prélèvements de janvier 2010 : ABEX (2,98 mg/l), BREX (2,84 mg/l), BRAV (2,39 mg/l), et ABAM (2,28 mg/l). La figure 3.18 montre la moyenne des concentrations en fer, par point de prélèvement. Ces valeurs sont supérieures à la valeur guide de qualité 0,02 mg/l fixée par la réglementation française. Ce qui place le fer dans la classe 3 des grilles multi-usages (Annexe 3). L'enrichissement du fer est dû au contexte géologique du milieu.

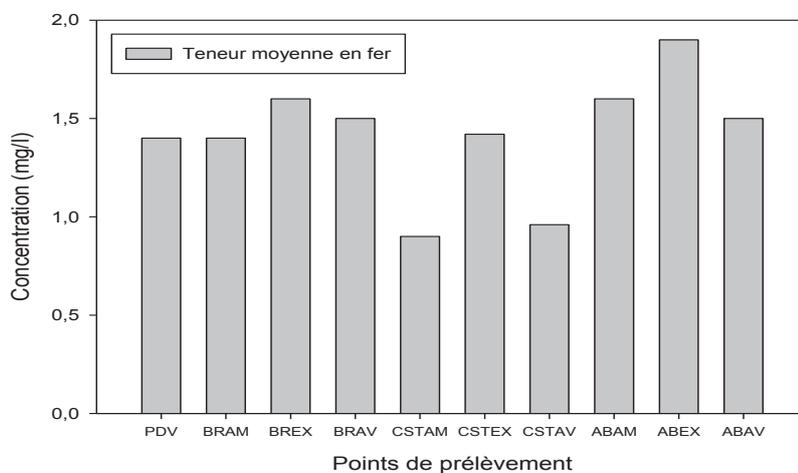


Figure 3.18 Teneur moyenne en fer

r- Le plomb

Les teneurs moyennes en plomb varient entre 0,01 mg/l et 0,04 mg/l (Tableau III.1). ABAM et ABAV ont enregistré respectivement 0,08 mg/l et 0,09 mg/l en janvier 2010. La valeur 0,09 mg/l est supérieure à la concentration en plomb des eaux du fleuve Niger (0,05 mg/l à Koulikoro) [110]. Ces valeurs sont supérieures à la valeur de la ligne directrice fixée par l'OMS (0,01 mg/l). Ce qui place le plomb dans la classe 3 des grilles multi-usages (Annexe 3). D'une façon générale, ces résultats montrent que les moyennes des concentrations s'élèvent progressivement de l'amont à l'aval. La figure 3.19 montre la moyenne des concentrations en plomb, par point de prélèvement.

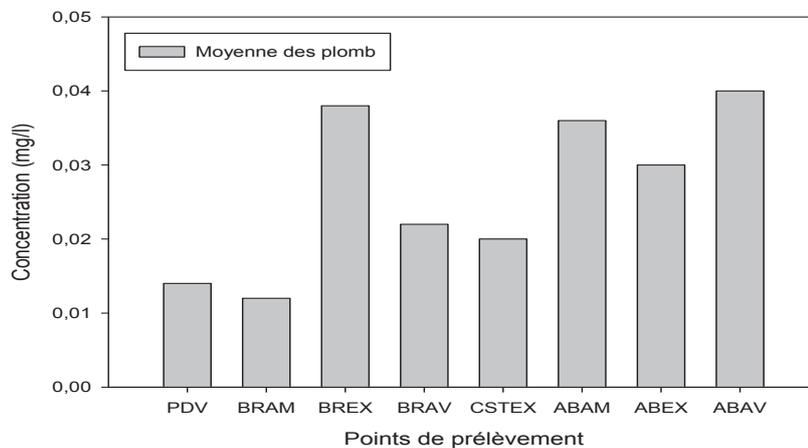


Figure 3.19 Teneur moyenne en plomb

Le plomb pourrait provenir de la gazoline des moteurs des camions et des batteries. L'apport à partir des carburants déversés sur les routes est très probable. Le réseau routier à N'Djamena est très proche du cours d'eau. La contribution des sols dans l'enrichissement en plomb n'est pas un facteur à négliger. Des études effectuées sur les fertilisants au Canada ont montré que ces produits contiennent jusqu'à 3,5 mg/kg de Pb (fertilisants azotés-phosphaté) de plomb [111]. Les rejets industriels, les déchets solides peuvent aussi constituer une origine de pollution des eaux de surface. Des analyses effectuées sur les ordures ménagères à l'échelle internationales ont révélé des teneurs de l'ordre de 450 mg/kg de Pb dans ces déchets [111].

s- Le cadmium

Les teneurs moyennes obtenues en cadmium oscillent entre 0,01 et 0,05 mg/l (Tableau III.1). Ces teneurs sont variables d'une campagne à l'autre. Le maximum de cadmium a été

enregistré aux points BREX, CSTEM, ABEX et ABAV. La forte charge des eaux usées explique ce résultat puisqu'il s'agit des points exutoires des industries. La charge en cadmium peut aussi avoir une origine agricole et/ou urbaine [112]. Ces valeurs sont très supérieures à la valeur de la ligne directive fixée par l'OMS (0,003 mg/l). Ce qui place le cadmium dans la classe 3 des grilles multi-usages (Annexe 3). La figure 3.20 montre la moyenne des concentrations en cadmium par point de prélèvement. La pollution en cadmium est importante dans les eaux du Chari.

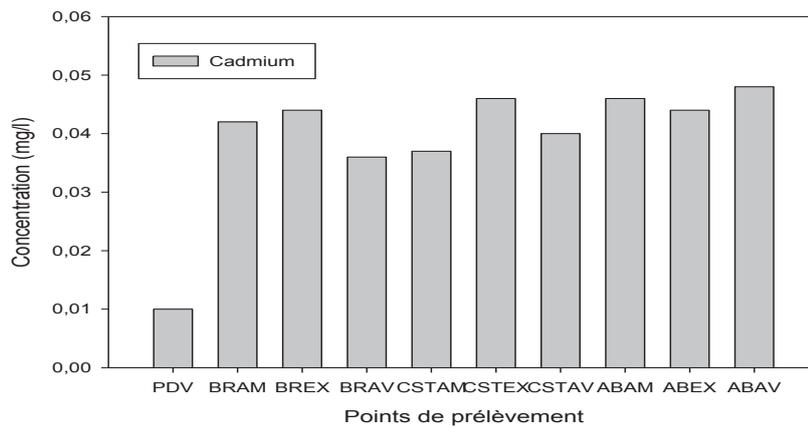


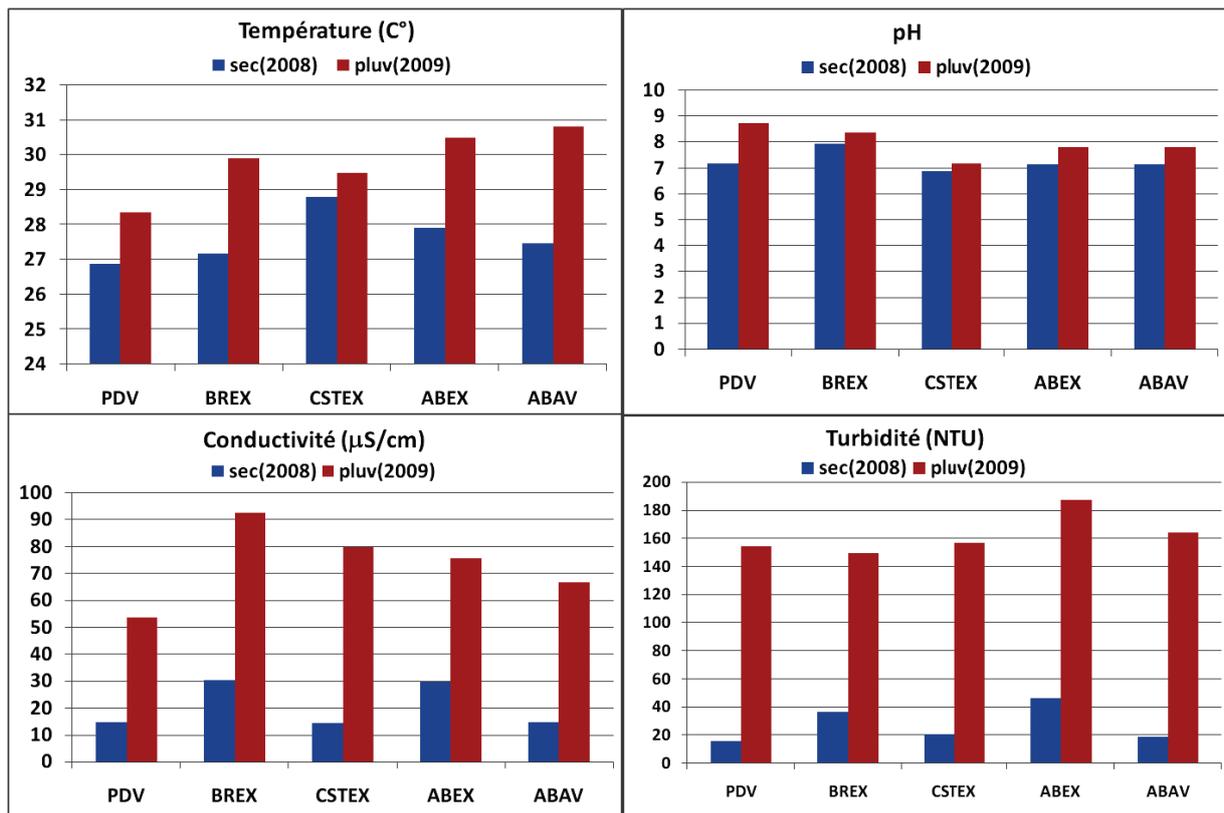
Figure 3.20 Teneur moyenne en Cadmium

III.2.2- Variation saisonnière des paramètres

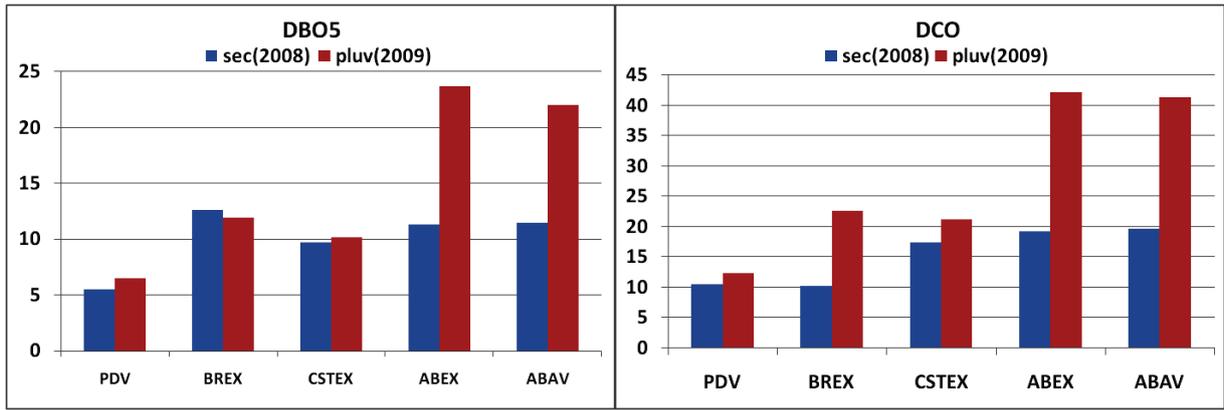
Le tableau et les graphiques qui suivent donnent une indication de la variation de chaque paramètre en fonction du climat (temps sec ou temps pluvieux).

Tableau III.6: Moyennes des résultats obtenus par saison et par point de prélèvement

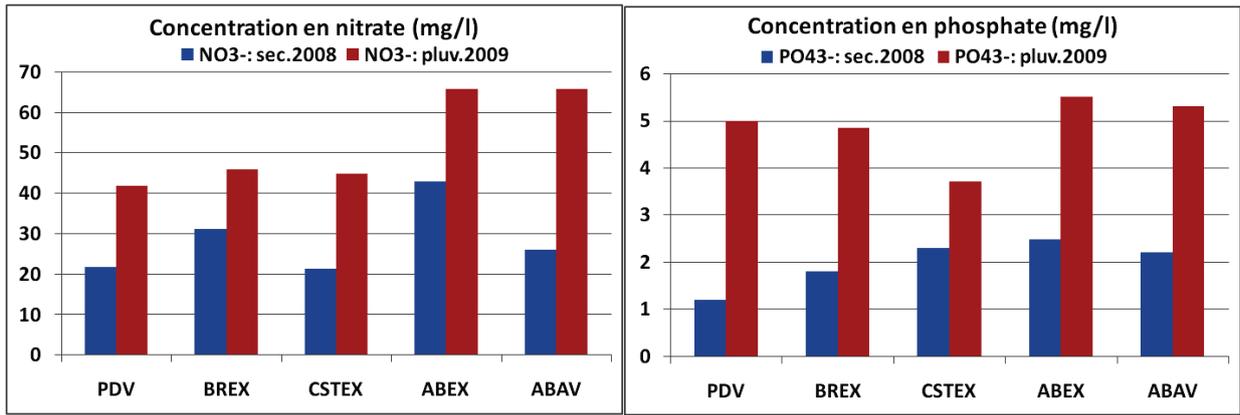
Paramètres	Valeurs moyennes									
	Temps sec 2008					Temps pluvieux 2009				
	PDV	BREX	CSTEX	ABEX	ABAV	PDV	BREX	CSTEX	ABEX	ABAV
T(°C)	26,87	27,17	28,80	27,92	27,47	28,35	29,90	29,50	30,50	30,82
pH	7,16	7,93	6,88	7,14	7,15	8,75	8,36	7,18	7,80	7,82
Cond. µS/cm	14,70	30,50	14,50	29,60	14,77	53,6	92,5	79,8	75,70	66,85
Turb. (NTU)	15,67	36,47	20,47	46,52	19,12	154	149,10	156,50	187,5	164
DBO5 (mg/l)	5,50	12,60	9,70	11,30	11,50	6,50	11,90	10,20	23,70	22,00
DCO(mg/l)	10,50	10,30	17,50	19,30	19,70	12,40	22,70	21,30	42,20	41,30
NO ₃ ⁻ (mg/l)	21,91	31,20	21,45	42,96	26,05	42,00	46,00	45,00	66,00	66,00
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	1,20	1,80	2,30	2,47	2,20	5,00	4,85	3,70	5,50	5,30
Cd (mg/l)	0,01	0,04	0,05	0,05	0,04	0,01	0,04	0,04	0,04	0,05
Pb (mg/l)	0,02	0,07	ND	0,05	0,06	0,01	0,02	ND	0,01	0,02
Zn (mg/l)	0,18	0,25	0,19	0,20	0,21	0,21	0,16	0,08	0,07	0,06
Cu (mg/l)	0,11	0,12	0,13	0,12	0,19	0,09	0,08	0,07	0,08	0,16
Cr (mg/l)	0,04	0,06	0,13	0,03	0,05	0,01	0,02	0,09	0,03	0,04
Mn (mg/l)	0,35	0,32	0,45	0,33	0,55	0,18	0,28	0,35	0,27	0,45
Ni (mg/l)	0,10	0,21	0,28	0,60	0,65	0,08	0,09	0,12	0,50	0,55
Fe (mg/l)	2,00	2,05	1,12	2,55	2,30	0,95	1,10	1,09	1,22	0,90



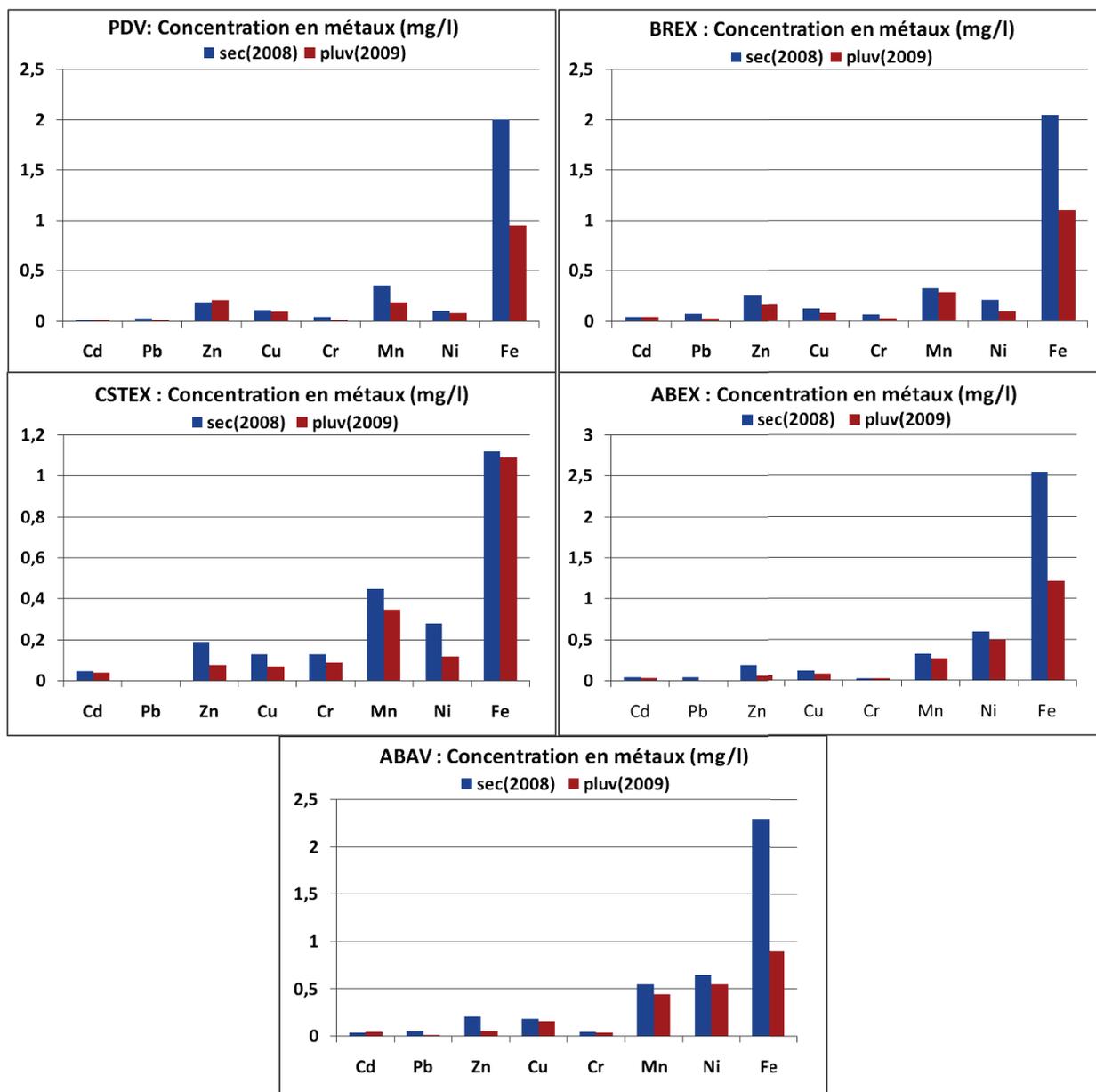
a)



b)



c)



d)

Figure 3.21 : variations des paramètres physico-chimiques en fonction de la saison de prélèvement (a), (b), (c), et (d).

On constate que la variabilité est essentiellement liée à la spécificité du site de mesure et notamment à la saison durant laquelle les prélèvements ont été réalisés. L'année n'a pas effet sur les paramètres, ce sont les facteurs « site » et surtout « mois » (saison) qui affectent les paramètres.

Il ressort globalement que la variation saisonnière des différents paramètres est assez significative. Les valeurs moyennes de pH des eaux oscillent de 6,88 à 7,93 pendant la saison sèche et de 7,18 à 8,75 pendant la saison des pluies. La conductivité qui constitue un bon

indicateur de la teneur de l'eau en matière dissoute est caractérisée par des pics importants en période de crue. Une forte turbidité des eaux prélevées en juillet (206 à 261 NTU) et en septembre 2009 (92,2 à 116 NTU), ce qui correspond donc à la saison des pluies où l'augmentation de la turbidité résulte du phénomène de ruissellement et d'érosion des eaux de pluies et celui de la remise en suspension des sédiments déposés antérieurement dans le fleuve. Les concentrations anioniques présentent une variabilité significative d'un événement pluvieux à un autre, mais peu par temps sec.

a- Phosphates et nitrates

Par temps de pluie, les taux de phosphate à tous les points de prélèvement suscitent des préoccupations. La totalité des points de prélèvement présente une teneur importante, supérieure à 3 mg/l. Ces taux font état d'une qualité médiocre ou déficiente ; la concentration moyenne affiche un défaut de conformité aux objectifs de qualité de l'eau.

La situation est aussi préoccupante pour les nitrates en temps de pluies avec deux tiers de point de prélèvement qui présentent des teneurs assez élevées (supérieures à 50 mg/l). Deux tiers des analyses révèlent donc un certain niveau de contamination avec des teneurs dépassant les 50 mg/l.

L'enrichissement des eaux par ces minéraux nutritifs (nitrates et phosphates) provenant de l'agriculture et des effluents domestiques et industriels provoquerait un phénomène de dystrophisation au final dans le lac Tchad où le renouvellement des eaux est beaucoup plus lent que celui d'un cours d'eau.

b- Les métaux

L'ensemble des points de prélèvement révèlent une contamination à des degrés variables en fonction du nombre de substances détectées et de leurs concentrations. Les métaux se retrouvent en plus grande concentration par temps sec dans le Chari car les effluents ne sont pas dilués du fait du faible débit du Chari pendant la saison sèche. Les points de prélèvement les plus touchés sont ceux des exutoires des brasseries et des abattoirs où cette contamination dépasse les normes de l'OMS. Le fer présente la teneur la plus élevée (2,55 mg/l).

Bien que le degré de contamination métallique soit fluctuant à l'échelle d'une année, le Chari montre une contamination régulière et élevée, ce qui nécessite en cas de production d'eau potable des traitements appropriés pour réduire la quantité des métaux lourds. La

contamination métallique du Chari est problématique aussi bien pour la vie aquatique que pour la santé publique. Ceci est attribuable au fait de la présence de prises d'eau de consommation des populations riveraines dans le Chari.

Le Chari est le premier apport fluvial au lac Tchad ; une contamination métallique même très faible est sans effet sur sa qualité propre, peut présenter un flux très important et nocif pour le lac Tchad s'il s'agit d'éléments persistants et accumulables par les organismes vivants.

c- La DBO5 et la DCO

La DBO5 et la DCO sont presque toujours beaucoup plus élevés par temps de pluie du fait des eaux de ruissellement qui entraînent de nombreuses matières organiques. Ces matières organiques proviennent des sources domestiques, industrielles et notamment des activités agricoles pendant la saison des pluies. Par temps de pluie, les charges polluantes ont tendance à augmenter ou à se maintenir au cours de leur circulation dans les caniveaux puis dans les collecteurs jusqu'au rejet dans le fleuve [113]. En revanche le comportement des charges polluantes par temps sec est beaucoup plus irrégulier du fait des caniveaux encombrés de sédiments et des plantes qui empêchent l'écoulement des eaux et qui réduisent de façon très significative l'arrivée des eaux polluées dans le fleuve. Ceci corrobore avec la pensée de Valarion [114], selon laquelle en matière d'eaux usées, les variations sont plus ou moins importantes et aléatoires, et l'on peut enregistrer des pointes et des creux au cours d'une même journée.

III.2.3- Analyse des données

Dans cette partie de l'étude, les données sont exprimées en flux de matières qui intègre les débits. Tous les points sont pris en compte.

Données globales :

Tableau III.7 Matrice de corrélations sur l'ensemble des prélèvements :

Corrélations													
	T(°C)	pH	Cond.	Turb.	Cd	Zn	Cu	Cr	Mn	Ni	Fe	NO3-	PO43-
T(°C)	1.0000	-0.3657	-0.2675	0.3009	0.3927	0.2535	0.3600	0.2988	0.2990	0.1499	0.4366	0.4080	0.4138
pH	-0.3657	1.0000	0.5314	0.1592	-0.5311	-0.4691	-0.5310	-0.4574	-0.3559	-0.2838	-0.5634	-0.3215	-0.3896
Cond.	-0.2675	0.5314	1.0000	0.6445	-0.5751	-0.5412	-0.5478	-0.4435	-0.4359	-0.4053	-0.5517	-0.4801	-0.5297
Turb.	0.3009	0.1592	0.6445	1.0000	-0.4300	-0.4207	-0.4119	-0.3452	-0.3313	-0.3199	-0.3897	-0.3125	-0.3660
Cd	0.3927	-0.5311	-0.5751	-0.4300	1.0000	0.7783	0.7471	0.7531	0.7747	0.5940	0.8671	0.7386	0.6349
Zn	0.2535	-0.4691	-0.5412	-0.4207	0.7783	1.0000	0.6956	0.5952	0.7538	0.4516	0.7964	0.6894	0.4734
Cu	0.3600	-0.5310	-0.5478	-0.4119	0.7471	0.6956	1.0000	0.5052	0.5825	0.3774	0.7897	0.6289	0.5665
Cr	0.2988	-0.4574	-0.4435	-0.3452	0.7531	0.5952	0.5052	1.0000	0.5807	0.4330	0.5955	0.4768	0.3411
Mn	0.2990	-0.3559	-0.4359	-0.3313	0.7747	0.7538	0.5825	0.5807	1.0000	0.6621	0.6933	0.6362	0.5631
Ni	0.1499	-0.2838	-0.4053	-0.3199	0.5940	0.4516	0.3774	0.4330	0.6621	1.0000	0.4888	0.5603	0.2592
Fe	0.4366	-0.5634	-0.5517	-0.3897	0.8671	0.7964	0.7897	0.5955	0.6933	0.4888	1.0000	0.8131	0.6233
NO3-	0.4080	-0.3215	-0.4801	-0.3125	0.7386	0.6894	0.6289	0.4768	0.6362	0.5603	0.8131	1.0000	0.5532
PO43-	0.4138	-0.3896	-0.5297	-0.3660	0.6349	0.4734	0.5665	0.3411	0.5631	0.2592	0.6233	0.5532	1.0000

Pour la matrice de corrélation, il existe une corrélation entre deux vecteurs x et y si :

- Corrélation positive : x et y varient dans le même sens
- Corrélation négative : x et y varient dans le sens opposé de l'autre
- Pas de corrélation : x et y varient de manière indépendante

Pour notre cas, les métaux sont corrélés entre eux ; leurs quantités varient de manière générale dans le même sens. Compte tenu du nombre de mesure la corrélation est statistiquement significative pour un coefficient de corrélation supérieur à 0.75 en valeur absolue.

Valeurs propres

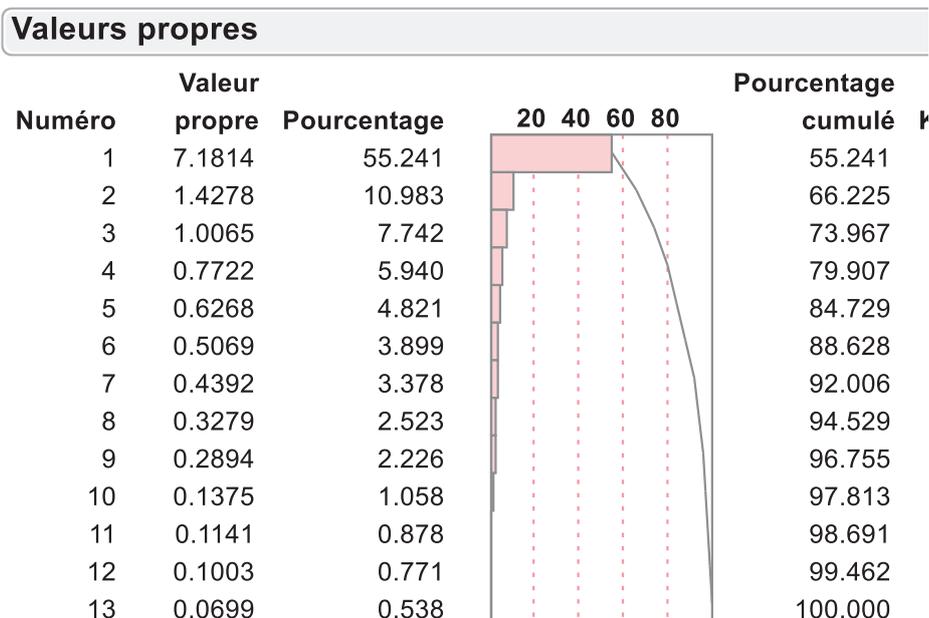


Figure 3.22 Valeurs propres

L'étude réalisée au niveau de la brasserie montre qu'à partir de deux composantes permet d'expliquer près de 66% des variations observés ; avec trois composantes on atteint 74%. On pourra donc utiliser des représentations graphiques bidimensionnelles ou tridimensionnelles.

Tableau III. 8 Matrice des facteurs sur l'ensemble des valeurs :

Matrice des facteurs							
	Principal 1	Principal 2	Principal 3	Principal 4	Principal 5	Principal 6	Principal 7
T(°C)	0.43986	0.79321	-0.11287	0.07133	-0.21285	0.15667	-0.19954
pH	-0.61503	-0.21351	0.41872	0.49313	0.07623	0.26005	-0.22510
Cond.	-0.71417	0.26303	0.42941	0.04329	0.34457	-0.03528	0.19811
Turb.	-0.50349	0.78668	0.22708	-0.09538	0.02254	-0.09441	0.08565
Cd	0.93663	0.02106	0.10175	-0.04656	0.08857	0.11036	0.02990
Zn	0.84919	-0.07160	0.10600	-0.02540	0.29048	-0.12569	-0.00016
Cu	0.82221	0.03668	-0.16744	0.06768	0.23681	-0.21060	-0.04007
Cr	0.71961	-0.00981	0.11703	-0.42937	0.17352	0.46494	-0.10485
Mn	0.81756	-0.01734	0.36172	0.05256	-0.02909	0.07427	0.30463
Ni	0.62751	-0.16768	0.50930	-0.14779	-0.48752	-0.14706	0.03153
Fe	0.91663	0.10303	0.00290	0.08033	0.16903	-0.14391	-0.07187
NO3-	0.81210	0.09286	0.21907	0.27815	-0.00399	-0.15338	-0.27645
PO43-	0.70140	0.10155	-0.28452	0.46133	-0.10445	0.21140	0.33648

L'axe principal 1 est construit avec la quasi-totalité des métaux de la conductivité électrique du pH et des anions, l'axe 2 avec la Température et la turbidité.

Représentation en deux dimensions (2D)

Représentation des variables en deux dimensions

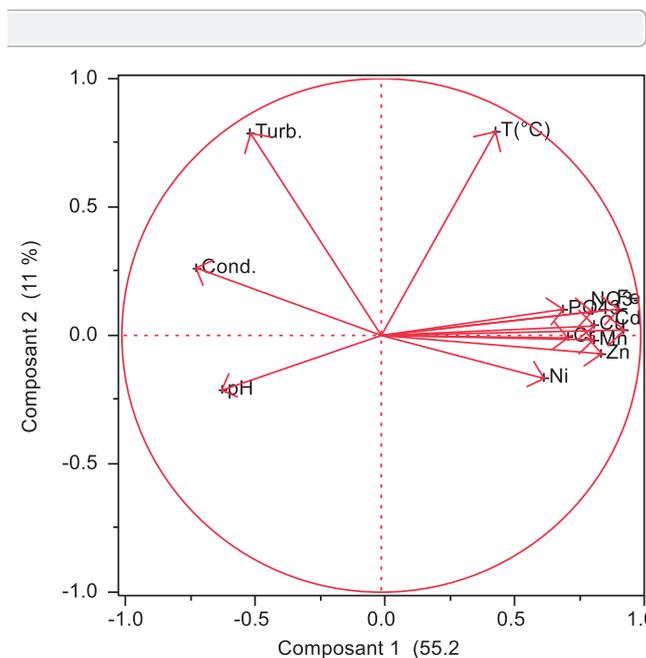


Figure 3.23 Représentation des variables

On retrouve sous forme graphique les informations déjà vu dans la matrice de corrélations. Conductivité et pH sont proches donc relativement corrélés. Les métaux sont regroupés indiquant une bonne corrélation entre eux. La conductivité est anti corrélée par rapport à ces derniers (vecteurs en opposition).

Représentation des individus :

a) Individus étiquetés selon les points de prélèvements

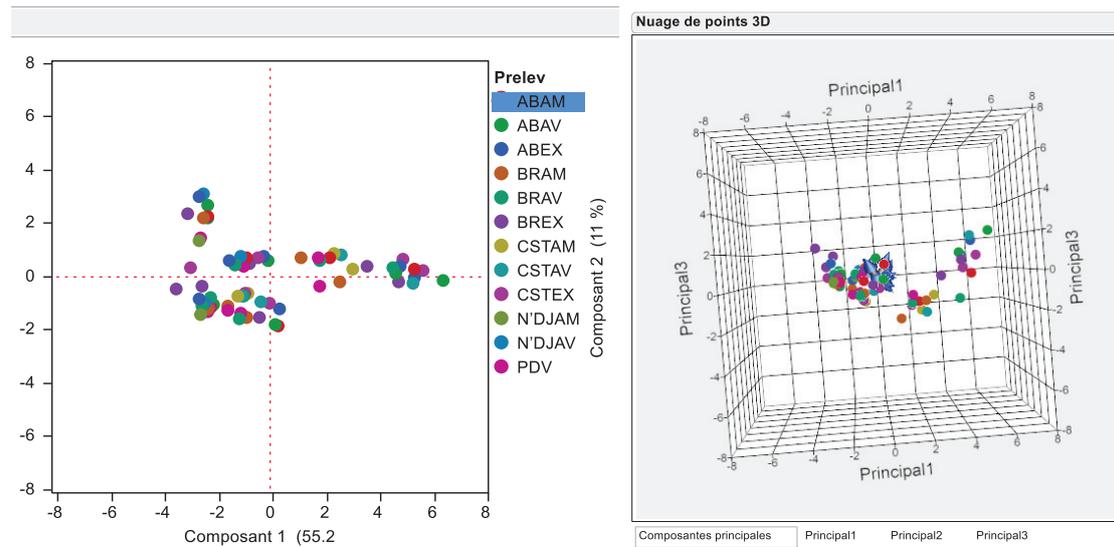


Figure 3.24 Représentation des individus

Nous n'observons pas de regroupements significatifs de points que ce soit en 2D ou même en 3D.

b) Individus étiquetés selon les points de débits (haut moyen bas)

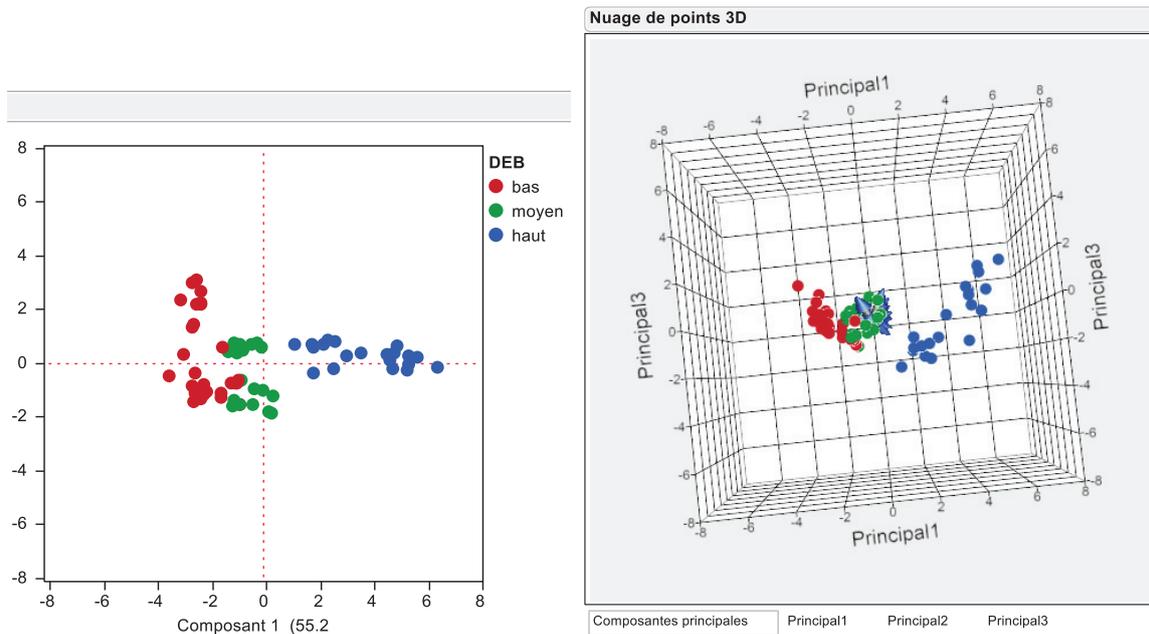


Figure 3.25 Représentation des individus

Dans ce cas, nous observons une partition en trois groupes à peu près distincts qui se différencient par le débit. Les hauts débits se caractérisent par des pH moins basiques, une plus faible conductivité et des flux de métaux plus importants certainement à la dilution des rejets.

Une piste intéressante pour différencier la pollution du fleuve est de pouvoir tenir compte des débits. Les informations dont nous disposons nécessiteraient d'être complétées avec d'autres échantillons. Dans l'avenir un système de mesure automatique du débit pourrait être couplé par la prise d'échantillons analysés.

Afin de voir s'il était possible d'améliorer l'analyse des résultats, nous avons décidé d'étudier les pollutions de manière sectorielle : Brasserie, sucrerie et abattoir avec comme étiquetage les débits. Ces études s'effectueront avec un jeu de données complètes ; aucuns points n'auront été supprimés pour effectuer l'analyse des données.

Données issues de la brasserie :

Tableau III. 9 Matrice de corrélations selon les débits :

Corrélations													
	T(°C)	pH	Cond.	Turb.	Cd	Zn	Cu	Cr	Mn	Ni	Fe	NO3-	PO43-
T(°C)	1.0000	-0.3811	-0.1949	0.4337	0.3257	0.1703	0.2633	0.2093	0.2133	0.0327	0.3786	0.2847	0.3616
pH	-0.3811	1.0000	0.5657	0.1149	-0.6023	-0.5017	-0.4671	-0.4088	-0.4113	-0.1901	-0.5920	-0.2550	-0.5391
Cond.	-0.1949	0.5657	1.0000	0.5821	-0.6172	-0.5054	-0.4448	-0.4401	-0.5213	-0.4276	-0.5769	-0.4297	-0.6016
Turb.	0.4337	0.1149	0.5821	1.0000	-0.5132	-0.4397	-0.3731	-0.3887	-0.4495	-0.4066	-0.4343	-0.3174	-0.4841
Cd	0.3257	-0.6023	-0.6172	-0.5132	1.0000	0.8294	0.7367	0.7577	0.8082	0.4049	0.9234	0.6200	0.7652
Zn	0.1703	-0.5017	-0.5054	-0.4397	0.8294	1.0000	0.7817	0.8037	0.8968	0.6005	0.8665	0.7188	0.4372
Cu	0.2633	-0.4671	-0.4448	-0.3731	0.7367	0.7817	1.0000	0.3739	0.7316	0.1658	0.7285	0.5405	0.6345
Cr	0.2093	-0.4088	-0.4401	-0.3887	0.7577	0.8037	0.3739	1.0000	0.7189	0.7866	0.7721	0.6215	0.2713
Mn	0.2133	-0.4113	-0.5213	-0.4495	0.8082	0.8968	0.7316	0.7189	1.0000	0.5382	0.8743	0.8420	0.4515
Ni	0.0327	-0.1901	-0.4276	-0.4066	0.4049	0.6005	0.1658	0.7866	0.5382	1.0000	0.5075	0.6733	0.0407
Fe	0.3786	-0.5920	-0.5769	-0.4343	0.9234	0.8665	0.7285	0.7721	0.8743	0.5075	1.0000	0.7021	0.6291
NO3-	0.2847	-0.2550	-0.4297	-0.3174	0.6200	0.7188	0.5405	0.6215	0.8420	0.6733	0.7021	1.0000	0.3878
PO43-	0.3616	-0.5391	-0.6016	-0.4841	0.7652	0.4372	0.6345	0.2713	0.4515	0.0407	0.6291	0.3878	1.0000

Comme précédemment, les métaux sont corrélés entre eux ; leurs quantités varient de manière générale dans le même sens.

Compte tenu du nombre de mesures la corrélation est statistiquement significative pour un coefficient de corrélation supérieur à 0.75 en valeur absolue.

Valeurs propres

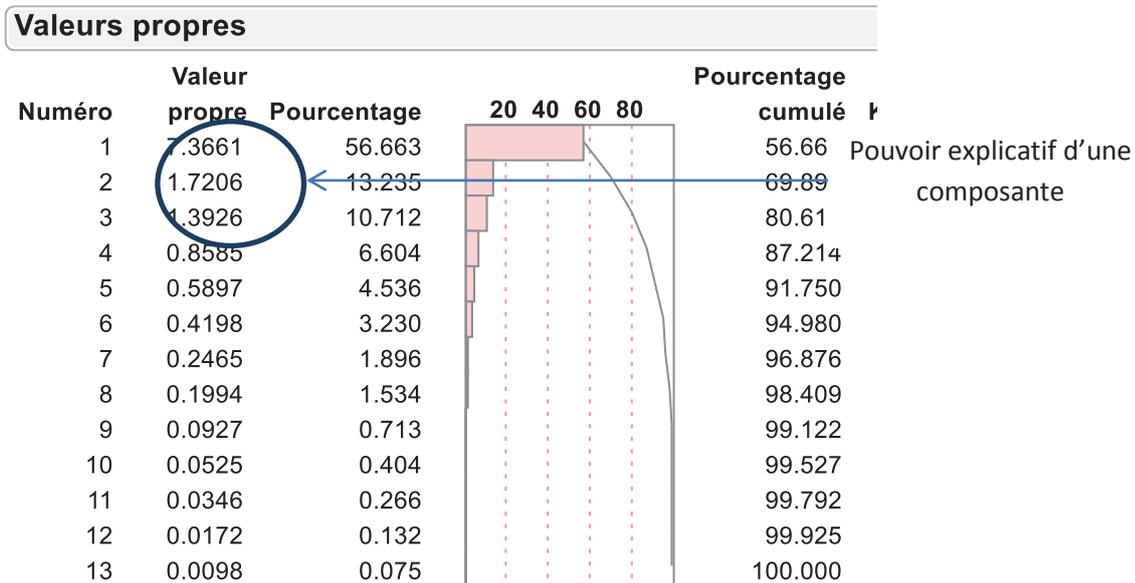


Figure 3.26 Matrice des valeurs propres

L'étude réalisée au niveau de la brasserie montre qu'à partir de deux composantes permet d'expliquer près de 70% des variations observés avec trois composantes on atteint 80%.

Tableau III. 10 Matrice des facteurs

Matrice des facteurs							
	Principal 1	Principal 2	Principal 3	Principal 4	Principal 5	Principal 6	Principal 7
T(°C)	0.31476	0.69977	0.52002	-0.13615	0.28038	0.09476	-0.14493
pH	-0.61300	-0.45861	0.05144	0.38584	0.40717	0.20830	-0.22083
Cond.	-0.70368	-0.05316	0.33852	0.45642	-0.19969	0.26182	0.22350
Turb.	-0.54423	0.46577	0.66118	0.04326	-0.10428	-0.10206	0.01079
Cd	0.93780	0.13893	-0.10035	0.03972	-0.07162	0.24800	0.00767
Zn	0.91603	-0.13657	0.11646	0.18642	-0.22460	-0.06804	-0.09494
Cu	0.76879	0.25131	-0.16283	0.44895	-0.08022	-0.18704	-0.15076
Cr	0.80101	-0.30532	0.30981	-0.19283	-0.17972	0.28379	-0.06557
Mn	0.90553	-0.12757	0.12422	0.26034	0.00974	-0.11918	0.00842
Ni	0.60601	-0.58385	0.33715	-0.32451	0.10248	-0.04693	0.02265
Fe	0.94777	0.08380	0.07577	0.06270	-0.07223	0.12377	-0.00680
NO3-	0.78087	-0.19618	0.30500	0.16948	0.35420	-0.18491	0.24998
PO43-	0.67337	0.45144	-0.44022	-0.00814	0.24291	0.20231	0.16557

L'axe principal 1 est obtenu avec la quasi-totalité des métaux et la conductivité, l'axe 2 avec la Température et le Nickel qui semble jouer un rôle particulier pour ce site de prélèvement. Pour l'axe 3 la variable la plus importante est la turbidité.

Représentation en deux dimensions (2D)

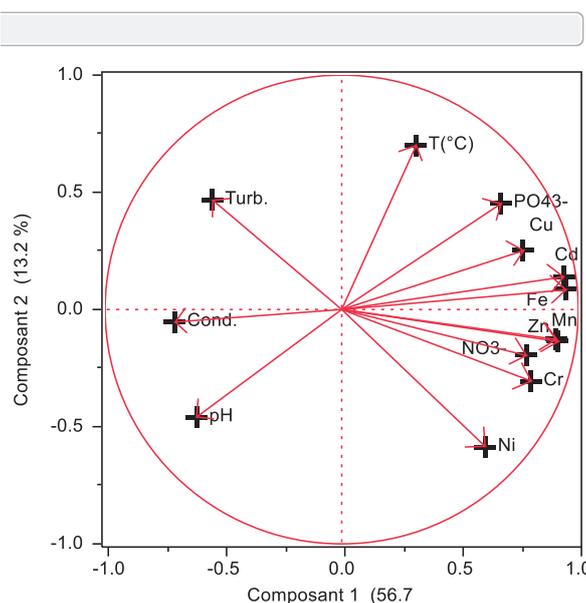


Figure 3.27 Représentation des variables

On retrouve sous forme graphique les informations déjà vu dans la matrice de corrélations. Conductivité et pH sont proches donc relativement corrélés. pH et Nickel sont des variables indépendantes (vecteurs orthogonaux) de même que nickel et phosphates. Les métaux sont regroupés indiquant une bonne corrélation entre eux. La conductivité est anti corrélée par rapport à ces derniers (vecteurs en opposition).

Représentation des individus :

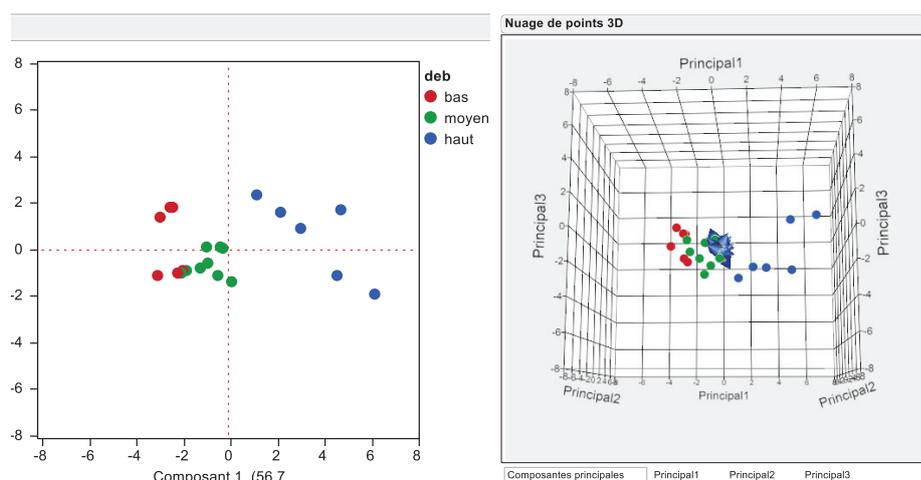


Figure 3.28 Représentation des individus

On observe trois groupes distincts qui se différencient par le débit. Ces graphiques confirment une bonne séparation entre de hauts débits et les autres, séparation plus nuancée entre certains moyens débits et faibles débits.

Données issues de la compagnie sucrière :

Tableau III. 11 Matrice de corrélations

Corrélations													
	T(°C)	pH	Cond.	Turb.	Cd	Zn	Cu	Cr	Mn	Ni	Fe	NO3-	PO43-
T(°C)	1.0000	-0.4893	-0.7810	-0.5394	0.7129	0.4751	0.7616	0.5468	0.4708	0.3405	0.7685	0.7604	0.6320
pH	-0.4893	1.0000	0.5295	0.1534	-0.7111	-0.4955	-0.7815	-0.5785	-0.4549	-0.3486	-0.7477	-0.4428	-0.4964
Cond.	-0.7810	0.5295	1.0000	0.7289	-0.4799	-0.4817	-0.5212	-0.3038	-0.3563	-0.3486	-0.4555	-0.3918	-0.4998
Turb.	-0.5394	0.1534	0.7289	1.0000	-0.2774	-0.3240	-0.2797	-0.1605	-0.2006	-0.2341	-0.2139	-0.1750	-0.2910
Cd	0.7129	-0.7111	-0.4799	-0.2774	1.0000	0.8117	0.7536	0.8883	0.7438	0.6250	0.8971	0.8001	0.5230
Zn	0.4751	-0.4955	-0.4817	-0.3240	0.8117	1.0000	0.3031	0.7213	0.7218	0.7109	0.5818	0.5643	0.3546
Cu	0.7616	-0.7815	-0.5212	-0.2797	0.7536	0.3031	1.0000	0.5850	0.3992	0.2124	0.9037	0.6996	0.6566
Cr	0.5468	-0.5785	-0.3038	-0.1605	0.8883	0.7213	0.5850	1.0000	0.4828	0.4056	0.6848	0.5548	0.1181
Mn	0.4708	-0.4549	-0.3563	-0.2006	0.7438	0.7218	0.3992	0.4828	1.0000	0.9387	0.6407	0.6831	0.5705
Ni	0.3405	-0.3486	-0.3486	-0.2341	0.6250	0.7109	0.2124	0.4056	0.9387	1.0000	0.4547	0.4840	0.4191
Fe	0.7685	-0.7477	-0.4555	-0.2139	0.8971	0.5818	0.9037	0.6848	0.6407	0.4547	1.0000	0.8723	0.7626
NO3-	0.7604	-0.4428	-0.3918	-0.1750	0.8001	0.5643	0.6996	0.5548	0.6831	0.4840	0.8723	1.0000	0.7931
PO43-	0.6320	-0.4964	-0.4998	-0.2910	0.5230	0.3546	0.6566	0.1181	0.5705	0.4191	0.7626	0.7931	1.0000

Comme précédemment, les métaux sont corrélés entre eux ; leurs quantités varient de manière générale dans le même sens. De nombreux facteurs semblent corrélés avec la température :

Compte tenu du nombre de mesures la corrélation est statistiquement significative pour un coefficient de corrélation supérieur à 0.75 en valeur absolue.

Valeurs propres

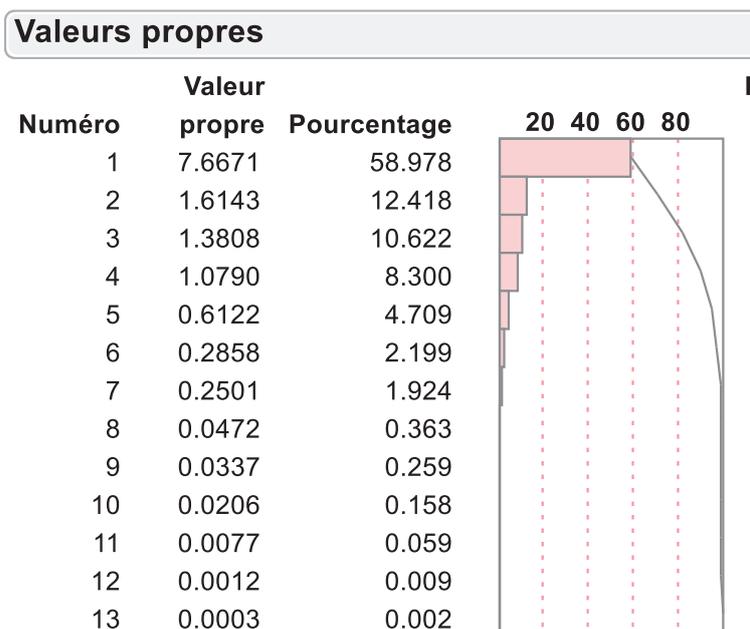


Figure 3.29 Matrice des valeurs propres

L'étude réalisée au niveau de la compagnie sucrière montre qu'à partir de deux composantes permet d'expliquer près de 71% des variations observés ; avec trois composantes on atteint 82%.

Tableau III. 12 Matrice des facteurs

Matrice des facteurs							
	Principal 1	Principal 2	Principal 3	Principal 4	Principal 5	Principal 6	Principal 7
T(°C)	0.83491	-0.39559	-0.05210	-0.01724	0.26098	-0.00325	0.25102
pH	-0.74126	0.07464	-0.27734	0.21809	0.55618	0.05272	0.02270
Cond.	-0.66521	0.50084	0.43160	0.12470	0.16268	0.16576	-0.21178
Turb.	-0.41527	0.51251	0.64926	0.15612	-0.08258	-0.19367	0.27056
Cd	0.94663	0.20475	0.10326	-0.19549	0.07975	0.03314	-0.04951
Zn	0.75912	0.39594	-0.30551	-0.22405	0.03297	-0.31386	-0.14007
Cu	0.81128	-0.33831	0.41256	-0.04578	-0.08521	0.20071	-0.00289
Cr	0.72777	0.27834	0.17197	-0.56213	0.19444	0.05217	0.00580
Mn	0.77709	0.45974	-0.23536	0.28338	-0.08093	0.14699	0.07133
Ni	0.65089	0.52256	-0.42663	0.21807	-0.15473	0.16430	0.10425
Fe	0.93005	-0.04105	0.32721	0.07305	0.02888	0.03204	-0.08792
NO3-	0.85279	0.03374	0.19733	0.30701	0.33491	-0.09012	-0.00247
PO43-	0.72499	-0.24671	0.07854	0.59768	-0.07374	-0.13297	-0.15084

L'axe principal 1 est obtenu avec la quasi-totalité des métaux et les données physico-chimiques, l'axe 2 avec la conductivité et le Nickel. Pour l'axe 3 la variable la plus importante est la turbidité.

Graphiques des résumés

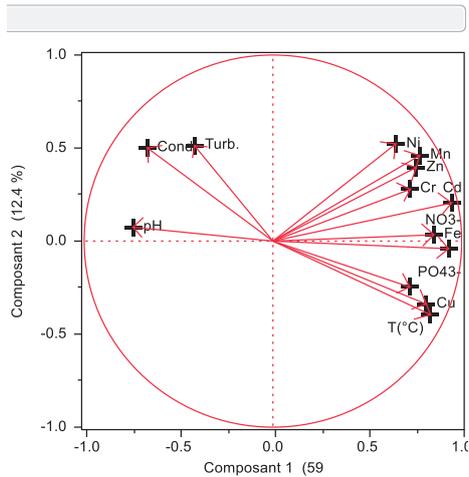


Figure 3.30 Matrice des variables

On retrouve les tendances précédemment observées. Il existe une forte corrélation entre la température et les métaux et les anions.

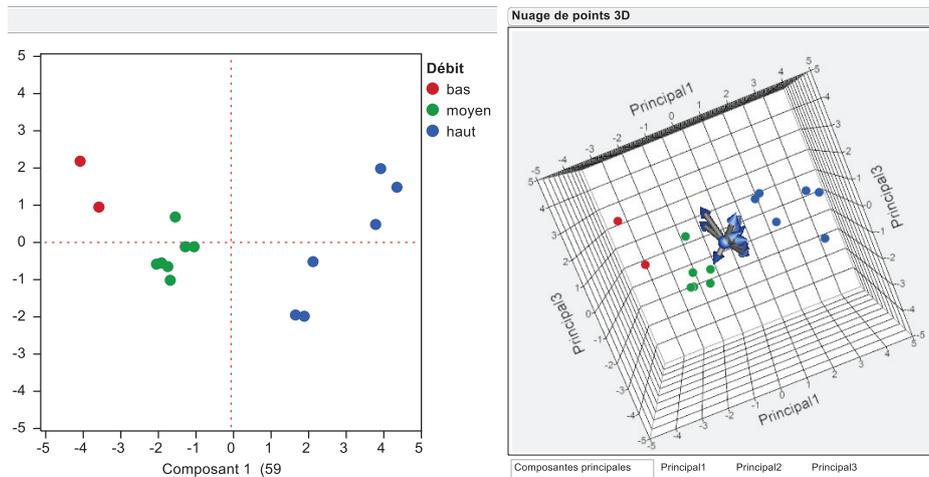


Figure 3.31 Matrice des individus

Dans ce cas, on obtient une séparation très distincte en trois groupes selon les débits.

Données issues de l'abattoir :

Tableau III. 13 Matrice de corrélations

Corrélations													
	T(°C)	pH	Cond.	Turb.	Cd	Zn	Cu	Cr	Mn	Ni	Fe	NO3-	PO43-
T(°C)	1.0000	-0.4593	-0.0905	0.4795	0.3070	0.2336	0.2896	0.2491	0.2729	0.1003	0.3574	0.3529	0.3291
pH	-0.4593	1.0000	0.4987	0.1650	-0.5154	-0.5108	-0.5750	-0.5812	-0.4372	-0.3757	-0.6143	-0.3198	-0.3980
Cond.	-0.0905	0.4987	1.0000	0.7468	-0.6709	-0.6069	-0.7081	-0.6830	-0.5792	-0.6782	-0.6777	-0.5251	-0.5410
Turb.	0.4795	0.1650	0.7468	1.0000	-0.4986	-0.4529	-0.5242	-0.5084	-0.4295	-0.5277	-0.4819	-0.3657	-0.3669
Cd	0.3070	-0.5154	-0.6709	-0.4986	1.0000	0.7947	0.8769	0.7141	0.8258	0.6869	0.9139	0.8312	0.6073
Zn	0.2336	-0.5108	-0.6069	-0.4529	0.7947	1.0000	0.7848	0.6950	0.8966	0.4505	0.8350	0.6746	0.6477
Cu	0.2896	-0.5750	-0.7081	-0.5242	0.8769	0.7848	1.0000	0.9285	0.8900	0.7850	0.8653	0.7329	0.5446
Cr	0.2491	-0.5812	-0.6830	-0.5084	0.7141	0.6950	0.9285	1.0000	0.8071	0.6878	0.7744	0.5710	0.5820
Mn	0.2729	-0.4372	-0.5792	-0.4295	0.8258	0.8966	0.8900	0.8071	1.0000	0.5080	0.7761	0.6228	0.6074
Ni	0.1003	-0.3757	-0.6782	-0.5277	0.6869	0.4505	0.7850	0.6878	0.5080	1.0000	0.6015	0.6407	0.2129
Fe	0.3574	-0.6143	-0.6777	-0.4819	0.9139	0.8350	0.8653	0.7744	0.7761	0.6015	1.0000	0.8406	0.6655
NO3-	0.3529	-0.3198	-0.5251	-0.3657	0.8312	0.6746	0.7329	0.5710	0.6228	0.6407	0.8406	1.0000	0.5919
PO43-	0.3291	-0.3980	-0.5410	-0.3669	0.6073	0.6477	0.5446	0.5820	0.6074	0.2129	0.6655	0.5919	1.0000

De nouveau, comme dans l'analyse globale, seuls les métaux sont corrélés entre eux ; leurs quantités varient de manière générale dans le même sens.

Compte tenu du nombre de mesures la corrélation est statistiquement significative pour un coefficient de corrélation supérieur à 0.75 en valeur absolue.

Valeurs propres :

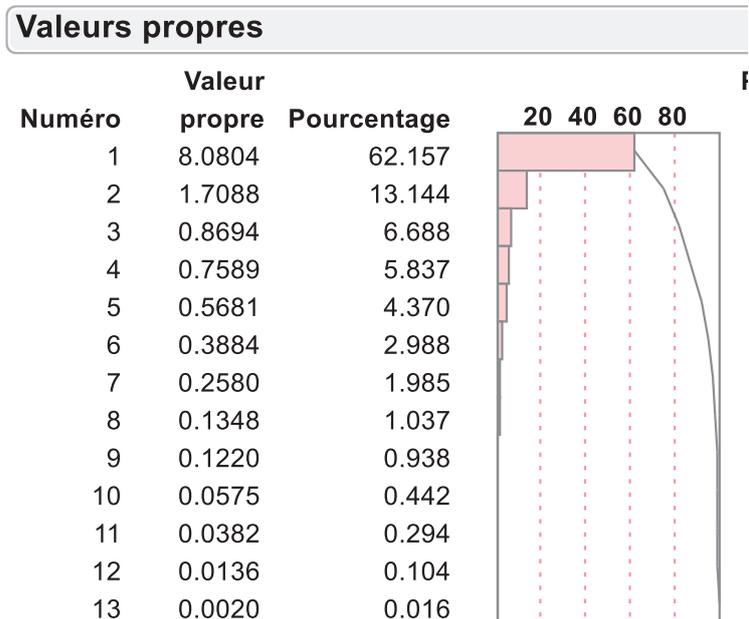


Figure 3.32 Matrice des valeurs propres

L'étude réalisée au niveau de la brasserie montre qu'à partir de deux composantes permet d'expliquer près de 75% des variations observés ; avec trois composantes on atteint 82%.

Tableau III. 14 Matrice des facteurs :

Matrice des facteurs							
	Principal 1	Principal 2	Principal 3	Principal 4	Principal 5	Principal 6	Principal 7
T(°C)	0.31420	0.88478	-0.15584	0.03978	-0.14831	0.16217	-0.17007
pH	-0.62010	-0.33813	0.33264	0.53480	0.03500	0.28297	-0.11886
Cond.	-0.79658	0.31072	0.12736	0.23903	0.28276	-0.10863	0.30319
Turb.	-0.58138	0.76448	-0.08804	0.14899	0.12811	0.03573	0.00043
Cd	0.92856	0.03408	0.03208	0.19328	-0.02142	-0.15980	-0.03527
Zn	0.86617	0.05965	0.28942	-0.03977	0.22790	-0.18589	-0.15778
Cu	0.95564	-0.01790	-0.14907	0.06633	0.19361	0.09307	0.05864
Cr	0.88063	-0.03305	-0.14042	-0.13777	0.21173	0.28552	0.19706
Mn	0.87568	0.05838	0.19835	0.02968	0.39261	0.07841	-0.12640
Ni	0.73042	-0.26185	-0.51765	0.27528	-0.06458	0.09632	0.01354
Fe	0.94010	0.10789	0.06640	0.05499	-0.07165	-0.19146	0.08407
NO3-	0.80736	0.10628	0.09260	0.45819	-0.25729	-0.11474	0.10072
PO43-	0.69817	0.17202	0.51330	-0.19995	-0.29006	0.23118	0.14579

L'axe principal 1 est obtenu avec la quasi-totalité des métaux en particulier le fer, le cuivre et le cadmium qui contribue de manière importante à la construction de cette axe. L'axe 2 est lui composé principalement de la température et de la turbidité.

Graphiques des résumés

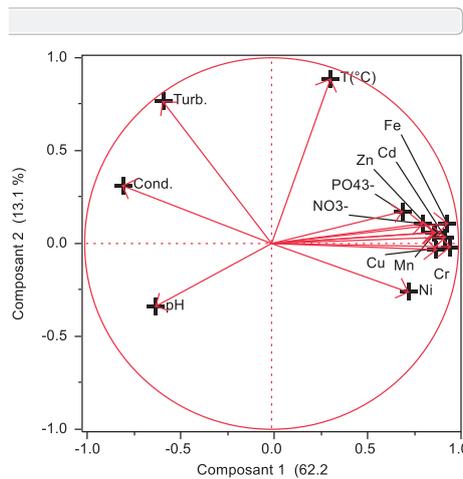


Figure 3.33 Matrice des variables

Ce graphique confirme l'importance du fer du cuivre et du cadmium dans la construction de l'axe 1, pour ce site des abattoirs.

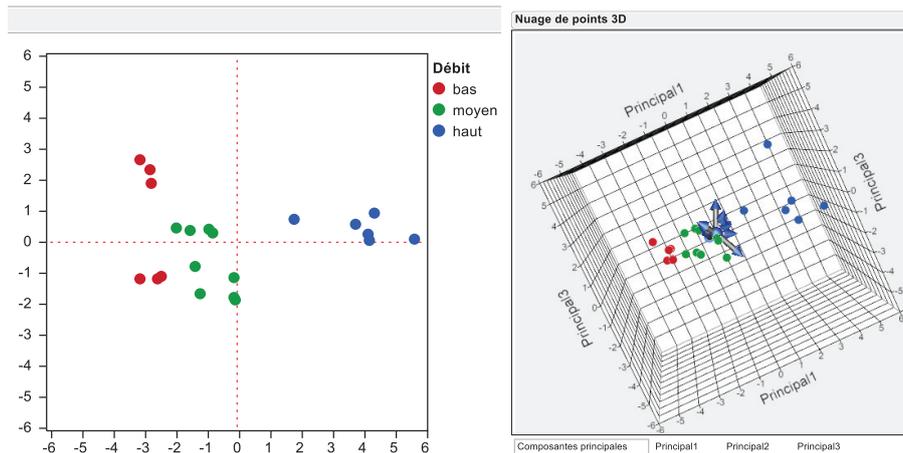


Figure 3.34 Matrice des individus

Dans ce cas, on obtient encore une séparation très distincte en trois groupes selon les débits. Les points sont plus concentrés autour de l'axe 1 notamment pour les débits élevés en relation avec les flux important de fer de cuivre et de cadmium.

Conclusions :

Compte tenu du nombre d'échantillons relativement faibles, on ne peut qu'indiquer des tendances :

- Parmi les paramètres physico chimiques l'influence de la température de la turbidité et de la conductivité pour les trois sites
- Pour les métaux, le nickel semble jouer un rôle plus important pour décrire la pollution des sites de la brasserie et de la sucrerie tandis que pour les abattoirs le fer le cuivre et le cadmium mériteraient d'être étudié ultérieurement en augmentant le nombre d'analyses.

III.2.4- La potentialité chimique et classes d'aptitude aux usages des eaux du Chari

III.2.4.1- Matières organiques et oxydables

Tableau III.15 Flux en kg/h de la demande en oxygène

Prélèv	Date	Débit(m ³ /s)	DBO5(mg/l)	DCO(mg/l)	DBO5(kg/h)	DCO(kg/h)
N'DJAM	11/10/08	1310	6,5	12,4	30654	58478,4
BREX	11/10/08	1310	11,9	22,7	56120,4	107053,2
CSTEX	11/10/08	1310	10,2	21,3	48103,2	100450,8
ABEX	11/10/08	1310	23	42,2	108468	199015,2
N'DJAV	11/10/08	1310	22	41,3	103752	194770,8

Prélèv	Date	Débit(m ³ /s)	DBO5(mg/l)	DCO(mg/l)	DBO5(kg/h)	DCO(kg/h)
N'DJAM	12/12/08	503	5,5	10,5	9959,4	19013,4
BREX	12/12/08	503	12,6	20,3	22816,08	36759,24
CSTEX	12/12/08	503	9,7	17,5	17564,76	31689
ABEX	12/12/08	503	11,3	19,3	20462,04	34948,44
N'DJAV	12/12/08	503	11,5	19,7	20824,2	35672,76

Prélèv	Date	Débit(m ³ /s)	DBO5(mg/l)	DCO(mg/l)	DBO5(kg/h)	DCO(kg/h)
N'DJAM	12/01/09	232	6,6	9,7	5512,32	8101,44
N'DJAV	12/01/09	232	8,9	15,3	7433,28	12778,56

Prélèv	Date	Débit(m ³ /s)	DBO5(mg/l)	DCO(mg/l)	DBO5(kg/h)	DCO(kg/h)
N'DJAM	09/01/10	184	7,2	15,6	4769,28	10333,44
N'DJAV	09/01/10	184	9,9	24,2	6557,76	16030,08

Les concentrations en DBO5 laissent apparaître majoritairement une eau de qualité moyenne à médiocre ; cette observation confortée par les flux de polluants est liée aux rejets des

brasseries, des abattoirs et aussi de la CST bien plus élevés au niveau des exutoires. Cette matière organique est bio dégradable, ce qui veut dire que le fleuve Chari a un bon pouvoir auto épurateur. Ces résultats devront être confortés par d'autres prélèvements afin de pouvoir réaliser des moyennes en fonction des débits du fleuve.

III.2.4.2 pH, turbidité et matières en suspension

La dispersion de l'ensemble des résultats sur le pH et la turbidité, ne permet pas d'effectuer des moyennes par lieu de prélèvement. On peut seulement remarquer :

- que le pH au niveau des brasseries a été anormalement élevé (rouge mauvaise qualité) en janvier 2009, ce qui indique un rejet acide ponctuel des brasseries
- que la turbidité au niveau de l'exutoire des brasseries (jaune qualité moyenne à rouge mauvaise qualité) et aussi des abattoirs (orange médiocre à rouge mauvaise qualité) est beaucoup trop élevée, empêchant la photosynthèse.

La dispersion des résultats nécessitera d'autres prélèvements, afin de confirmer les remarques et aussi de déterminer l'impact d'autres sources de pollution diffuse.

III.2.4.3 – Nitrate, Phosphate et micropolluants minéraux

Tableau III.16 Classes de qualité des métaux, nitrates et phosphates (moyenne des résultats analytiques)

Prélèv	Débit (m ³ /s)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Cu (mg/l)	Cr (mg/l)	Mn (mg/l)	Ni (mg/l)	Fe (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)
PDV	Haut	0.015	0.015	0.155	0.125	0.015	0.1	0.012	1.835	23.525	1.065
PDV	Moyen	0.01	0.015	0.2	0.095	0.01	0.2	0.13	0.8	30.35	3.535
PDV	Faible	0.0133	0.0100	0.1967	0.0833	0.0267	0.4000	0.1167	1.4933	38.5667	4.1400
BRAM	Haut	0.04		0.105	0.105	0.025	0.11	0.0125	1.47	28	4.15
BRAM	Moyen	0.035		0.075	0.055	0.015	0.25	0.2	1.16	23.4	6.17
BRAM	Faible	0.030	0.030	0.030	0.063	0.067	0.033	0.500	0.150	14.630	2.171
BREX	Haut	0.04	0.07	0.265	0.13	0.06	0.3	0.2	2.02	31.24	1.945
BREX	Moyen	0.035	0.045	0.205	0.09	0.025	0.295	0.145	1.56	40.21	3.4
BREX	Faible	0.043	0.030	0.163	0.073	0.047	0.300	0.113	1.417	41.810	3.913
BRAV	Haut	0.035		0.16	0.225	0.01	0.25	0.0215	1.48	22.45	4.625
BRAV	Moyen	0.025	0.025	0.006	0.07	0.065	0.01	0.25	0.075	12.75	2.282
BRAV	Faible	0.030	0.030	0.083	0.137	0.037	0.367	0.170	1.660	26.430	4.250
CSTAM	Haut	0.03		0.085	0.125	0.025	0.23	0.04	1.46	22.2	5.51
CSTAM	Moyen	0.02		0.04	0.12	0.04	0.11	0.05	0.35	24.2	4.25
CSTAM	Faible	0.03		0.28	0.08	0.07	0.22	0.52	0.33	24.2	5.52

ABAM	Haut	0.035		0.2	0.095	0.03	0.4	0.112	1.865	22.15	6.1
ABAM	Moyen	0.055	0.06	0.08	0.11	0.025	0.35	0.935	1.205	21.805	3.39
ABAM	Faible	0.0533	0.0345	0.1000	0.1133	0.0333	0.4333	0.7067	1.6933	20.8500	3.7200
ABEX	Haut	0.055	0.055	0.22	0.125	0.02	0.335	0.585	2.58	42.755	2.53
ABEX	Moyen	0.05	0.03	0.155	0.095	0.035	0.31	0.58	1.87	53.65	4.02
ABEX	Faible	0.040	0.023	0.093	0.097	0.030	0.290	0.527	1.667	59.020	4.433
ABAV	Haut	0.045	0.065	0.21	0.195	0.055	0.6	0.675	2.23	26.35	2.305
ABAV	Moyen	0.035	0.04	0.145	0.165	0.035	0.55	0.58	1.615	46.52	3.23
ABAV	Faible	0.040	0.030	0.110	0.173	0.047	0.430	0.593	1.400	52.180	4.557

Les matières phosphorées sont de qualité mauvaise, y compris en amont de N'DJAMENA (PDV). Cela contribue pleinement à la prolifération d'algues. Cette constatation devra être confirmée par d'autres prélèvements beaucoup plus en amont de la ville.

Les nitrates eux aussi très élevés gênent la production d'eau potable.

Les micropolluants minéraux sont pour la plupart d'entre eux et notamment les métaux lourds beaucoup trop élevés quelque soit le débit du fleuve, entraînant une eau de très mauvaise qualité. Ils sont toxiques pour les êtres vivants et en particulier les poissons. Ils gênent la production d'eau potable, à cause de la mise en œuvre de techniques de dépollution sophistiquées. Il faudra déterminer leur origine, car à l'entrée de la ville, ils sont déjà très élevés. Comme ces métaux précipitent en milieu basique, il sera nécessaire dans un avenir proche d'analyser les teneurs en métaux des sédiments.

III.2.3.4 – Conclusion

A partir de l'analyse des résultats obtenus sur l'ensemble des campagnes de prélèvement, nous pouvons observer que l'aptitude globale à permettre les équilibres chimiques varie de bonne à mauvaise dans le Chari. Globalement, les campagnes de prélèvement ont révélé de forte température de l'eau sur l'ensemble des stations étudiées. Les résultats font apparaître des classes d'aptitude qui varient de la classe bonne à la mauvaise. Les paramètres phosphore, nitrate, plomb, cadmium, fer, nickel, manganèse, chlorure et fluorure sont les plus déclassant (classe mauvaise). L'absence de traitement des eaux usées issues des rejets se traduit par des teneurs élevées en ces paramètres. L'origine de la contamination peut être liée à différents apports :

- Des rejets d'eaux usées d'origine domestique.

- Des eaux résiduaires industrielles comportent des teneurs non négligeables en métaux et en matière phosphorées et azotées. Les matières azotées et phosphorées favorisent le développement des végétaux aquatiques et dans certaines conditions, elles peuvent développer un risque de toxicité pour les poissons (ammoniac).
- Des rejets d'eaux usées d'origine hospitalière. Les substances chimiques utilisées dans les hôpitaux pour les activités de soins et pour la recherche médicale sont les plus souvent retrouvées dans les effluents liquides [5].
- De l'utilisation d'engrais phosphaté en agriculture.

Ces observations révèlent un facteur anthropique à la contamination. Au point PDV, la situation est faiblement dégradée car cette station est située en amont des principaux points de rejet (exutoires des industries et autres points de déversement). On constate une situation dégradée en aval de la ville car l'influence des rejets sur la qualité des eaux du Chari est importante.

Usage domestique : l'aptitude de l'eau à permettre l'usage production d'eau potable est qualifiée de médiocre. Le suivi de la qualité des eaux du Chari montre que tous les points de rejet d'eau dans le fleuve dépassent les normes de qualité OMS sur plus de la moitié des paramètres analysés. Les paramètres sur lesquels il est urgent d'agir en priorité sont la DBO₅, la DCO et les métaux lourds. Les eaux du fleuve Chari couramment consommées par la population riveraine dépassent les normes de qualité pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. La présence en grande concentration de coliformes et de streptocoques fécaux (LABEEN 2007) suffit à elle seule à rendre non potable les eaux du Chari. Ceci atteste de la mauvaise protection des ouvrages d'aisance et de la pollution fréquente des sols par les excréments. Afin d'utiliser cette eau pour la production d'eau potable, il convient de lui faire subir un traitement normal de type physique, chimique et désinfection.

Usage pour l'irrigation. A partir de l'analyse des résultats obtenus sur l'ensemble des années d'étude, nous pouvons dire que l'usage irrigation est possible. Les contraintes imposées étant moins drastiques, la qualité des eaux du Chari obtenue peut être qualifiée de bonne au regard du SEQ-Eau.

Usage abreuvement des animaux. Les teneurs en nitrate et en phosphate obtenues dans le Chari ne sont pas très déclassant pour l'abreuvement (classe de qualité passable). Les animaux moins vulnérables (ovins et bovins) peuvent s'abreuver sous une surveillance et loin des points de déversement des eaux usées. La qualité métallique du Chari et plus particulièrement les teneurs en cadmium et en plomb ne permettent pas un bon abreuvement des animaux. Le principal risque est un risque indirect pour l'homme par accumulation et ensuite contamination indirecte de l'homme qui consomme les animaux sans toutefois sous-estimer le risque direct pour l'animal.

CHAPITRE 4

CONCLUSION – RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

IV.1- Conclusion

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une réflexion commune sur la qualité des eaux du fleuve Chari entamé conjointement par le Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement de l'Université de N'Djamena et l'Université Claude Bernard Lyon1. L'objectif a été l'identification des polluants de type métaux lourds retrouvés dans différentes eaux tchadiennes destinées à la consommation humaine. Une étude bibliographique sur les effluents industriels nous a permis de synthétiser les informations sur les caractéristiques physicochimiques des rejets liquides provenant des établissements retrouvés au Tchad.

Il apparaît que les résultats obtenus sur l'état de la qualité physicochimique des eaux du Chari mettent en relief l'impact de la pollution générée par les rejets des eaux domestiques, agricoles et industrielles. Il apparaît également que le Chari, richesse de notre patrimoine eau, est mal entretenue et laissée à l'abandon. Les valeurs des paramètres physicochimiques retenus pour la caractérisation de cette pollution dépassent généralement les recommandations de l'OMS et les normes internationales. De ce fait, les eaux du Chari sont impropres, du point de vue physicochimique, voire potentiellement dangereuses pour la santé environnementale et humaine. Les dangers sont d'origine soit naturelle soit anthropique et les contaminations minérales ou organiques peuvent provenir de la ressource mais également de relargage à partir des matériaux en contact ou générées sous forme de sous-produits des traitements.

L'activité des populations riveraines peut être responsable au premier chef de la dégradation de la qualité des eaux du Chari. On peut citer entre autres les activités agricoles, les activités domestiques, les activités artisanales, les activités commerciales, le transport etc. A N'Djamena il y a la surconcentration des populations déficitaires de conscience écologique sur certains espaces insalubres. Un surpeuplement qui est le résultat d'un exode rural dû à l'absence d'une politique de développement harmonieux et équitable de toutes les régions du pays. Il convient ainsi d'améliorer le niveau de connaissance sur les flux des polluants et modéliser avec précision les impacts des rejets ponctuels par rapport à la contamination.

La DBO5, la DCO, les ions phosphate et nitrate sont gênants pour la vie aquatique puisqu'ils contribuent à la dégradation de la qualité de l'eau. La pollution existe car la DBO5 atteint 22 mg/l. On observe cependant une variabilité spatiale et temporelle des paramètres physicochimiques de l'eau. Les teneurs des paramètres au niveau des exutoires industriels sont élevées, mais le niveau de dilution est aussi important, ce qui tend à une qualité de l'eau relativement moyenne pour les paramètres physicochimiques. Les valeurs moyennes de pH

indiquent que les effluents ont un caractère légèrement alcalin. Les valeurs moyennes de l'oxygène dissous sont supérieures à 5 mg/l. Ces valeurs peuvent assurer un taux de survie acceptable des poissons. Les concentrations des autres paramètres indicateurs de la pollution organique (orthophosphates, nitrates) fluctuent en fonction des périodes. L'enrichissement de l'eau en ces éléments peut provoquer un développement accéléré des algues (eutrophisation). Certaines de ces algues peuvent être toxiques pour l'homme (sécrétion de toxine). La décomposition de ces algues peut aussi accroître la consommation d'oxygène et peut conduire à la mort des espèces aquatiques par asphyxie. Ces paramètres subissent en effet une augmentation suivant des points de prélèvement : ce qui montre que les eaux usées contribuent à l'augmentation de la charge polluante du Chari.

IV.2- Recommandations

Les recommandations qui suivent portent sur des points considérés comme essentiels pouvant ramener la pollution des eaux à un niveau acceptable. Plusieurs polluants, plusieurs listes mais...un seul objectif : « l'atteinte du bon état chimique et écologique de l'eau ». La lutte contre les pollutions doit être entreprise le plus précocement possible, en privilégiant les actions préventives. Cette lutte nécessite des actions d'information-sensibilisation, la multiplication des aménagements d'assainissement et d'épuration, le fonctionnement d'un réseau de surveillance, la disposition de moyen de mesure et de capacités d'interprétation, et le support d'une réglementation explicite.

IV.2.1- Sur le plan technique

- La mise en œuvre du volet hygiène publique et assainissement qui prévoit l'équipement des villes en réseaux de collecte et d'assainissement des effluents s'avère indispensable. Une augmentation des services de la voirie permettant de mieux gérer les déchets solides.
- La fixation d'un périmètre de sécurité de 20 mètres sur chaque berge du Chari, et l'interdiction de toute activité dans cet espace. Par ailleurs, il faut concevoir et valider des systèmes de plantation des arbres dans ce périmètre, tout en respectant les contraintes de production agricoles et de la préservation de l'environnement (épandage, irrigation, recyclage...).
- La gestion des inondations et des risques climatiques compte tenu de la vulnérabilité accrue des biens et des personnes. Il y a ainsi un besoin urgent d'améliorer les données

hydrométriques et de constituer de nouvelles bases de données de natures socio-économiques pour conjuguer au mieux les aléas avec les enjeux.

- La création des stations d'épurations et des procédés de traitement des eaux usées. Le remplacement éventuel des stations d'épuration défectueuses.

IV.2.2- Sur le plan réglementaire

La sensibilisation reste le seul remède efficace pour la prise de conscience de la population.

- Création d'un office national de l'eau et de l'assainissement. Cet office sera chargé de mettre en application les règles élaborées. En effet, le code de l'eau est la seule loi qui régit le domaine de l'eau. Toutefois les décrets d'application de cette loi ne sont pas tous promulgués. Cela constitue une contrainte au développement harmonieux du secteur, notamment au niveau de la définition et du partage de responsabilité entre les différents acteurs et au plan de la gestion des équipements d'exploitation des ressources en eau.
- Création d'une agence assermentée pour la surveillance et le contrôle de la qualité de l'eau. L'agence doit s'offrir les moyens de caractériser, de contrôler et de maîtriser la qualité de l'eau.
- Plaider à juste titre la mise en place des permis de l'Etat d'éliminer ou de décharger des effluents sur le sol

IV.2.3- Sur le plan de la recherche

La recherche doit offrir les moyens de caractériser, de contrôler et de maîtriser la qualité de l'eau. Les chercheurs doivent pouvoir s'intégrer avec profit dans les études interdisciplinaires sur les milieux aquatiques pour étudier les mécanismes qui contrôlent l'accumulation, le transport et la transformation des polluants dans ces milieux. A ce titre il convient de :

- poursuivre et améliorer les études actuellement en cours en vue d'une meilleure compréhension des phénomènes de pollution ;
- élaborer des techniques pour détecter et quantifier des (ultra) traces des composés ;
- structurer et soutenir une recherche pharmaco-toxicologique pour l'évaluation des effets chimiques et biologiques des mélanges complexes de micropolluants ;

- constituer une banque de données chargées de gérer, sous le contrôle des enseignants chercheurs, l'ensemble des données recueillies par les différents programmes de surveillance ;
- surveiller les filières de traitement, les réseaux de distribution des eaux et ceux des effluents rejetés;
- renforcer la fiabilité des systèmes de collecte, traitement, stockage et distribution des eaux destinées à la consommation.

IV.3- Perspectives

L'état global d'un hydrosystème et son évolution est conditionné en partie par les échanges eau-sédiments. Les sédiments constituent ainsi une source interne de contamination par métaux par le biais du phénomène de remobilisation. Notre étude n'ayant pas pris en compte la matrice sédiments, il serait intéressant qu'une étude ultérieure s'y attarde, au regard surtout de la teneur en MES, et compte tenu du phénomène d'enkystement de certains microorganismes. L'analyse microbiologique devra être étendue aux microbes pathogènes, et notamment aux germes des maladies hydriques les plus couramment diagnostiquées dans les districts de santé. Les résultats devront permettre la mise en œuvre d'un système d'alerte des populations et du Gouvernement sur les risques de pollution du fleuve Chari et une application de la législation en matière de protection de l'environnement. Au vu des résultats, il semble nécessaire de continuer des campagnes annuelles d'analyse physicochimiques des eaux afin de mieux comprendre l'évolution temporelle des paramètres. Il est, de ce fait, nécessaire de mettre à la disposition des chimistes des moyens leur permettant d'exercer leur recherche principalement dans les thématiques de détection, de quantification des traces des composés (pesticides, fongicides, insecticides...) de l'élimination ou de la transformation des matières organiques naturelles, des polluants et micropolluants présents dans les eaux douces superficielles.

V- REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] CLAUS B., ROBERT P. *Chimie de l'environnement* 2^e édition. Edition de boeck 2008, 271p.
- [2] CHRISTIAN N. et ALIAN R. *Déchets, effluents et pollution. Impact sur l'environnement et santé.* 2e édition DUNOD, 108p.
- [3] JONATHAN O., OKONKWO and MATHIBA M. *Physico-chemical characteristics and pollution levels of heavy metals in the rivers in Thohoyandou, South Africa.* Elsevier Journal of Hydrology 2005, 308 : 122-127
- [4] MICHEL M. *La pollution des fleuves.* La Recherche, 1990 ; vol. 21 ; n°221 : 608-617.
- [5] EVENS E. *Evaluation des risques sanitaires et écotoxicologiques liés aux effluents hospitaliers.* Thèse INSA, Lyon, 2004, 246p.
- [6] *Profil national du Tchad sur la gestion des produits chimiques 2002.* MEE-UNITAR, 115p.
- [7] *Annuaire des Statistiques Sanitaires du Tchad, Tome A, 2007, 21e édition*
- [8] MALLEVIALE J. et CHAMBOLE T. *La qualité de l'eau.* La Recherche, 1990 ; vol. 21 ; n°221 : 598-606.
- [9] Ministère de la Santé et des Solidarités (2007). Décrets, arrêtés, circulaires. *Journal officiel de la République française*, 9p.
- [10] RAYMOND D. *Le traitement des eaux.* 2^e Edition de l'école polytechnique de Montréal 1997, 304p.
- [11] GIL MICHARD. *Equilibres chimiques dans les eaux naturelles,* Publisud, 1989, 357p.
- [12] MSTP (Mission Scientifique Technique et Pédagogique). *L'Eau enjeux et perspectives de recherche,* 2007, 110p .
- [13] www.diren@lorraine.ecologie.gouv.fr *La qualité des cours d'eau en Lorraine* Direction Régionale de l'Environnement Lorraine.
- [14] FRANCOIS A. *L'eau et ses enjeux.* De boeck, les presses de l'université Laval, 2008, 228p

- [15] ASHTON P., and SEETAL A. *Challenge of water ressource management in Africa*. Rebirth of Science in Africa. South Africa 2002, 133-148p.
- [16] CLAUDE B., TONY C. *L'or bleu, l'eau le grand enjeux du XXI e siècle*, Fayard, 2002, 289p.
- [17] SCHARLER UM and BAIRD D. *The influence of catchment management and phytoplankton biomass of Eastern Cape estuaries, South Africa*. Est. Coast. Shelf Sci., 2003, 56 : 753-748p.
- [18] CAROLE C., DELPHINE L., JEAN-PIERRE T., ANNE G., BEATRICE B., VINCENT B. *Les micropolluants dans l'eau*. <http://environnement.wallonie.be>.
- [19] JOEL M., THIERRY C. *La qualité de l'eau*. La recherche 1990, N° 221, Volume 21, 598-606p.
- [20] EZERONYE O.U., UBALUA A.O *Studies on the effect of abattori and industrial effluents on the heavy metals and microbial quality of Aba river*. African Journal of Biotechnology 2005, vol. 4 (3) : 266-272.
- [21] OMS et UNICEF. Rapport sur l'évaluation de la situation mondiale de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement en 2000. Disponible sur le site : http://www.who.int/water_sanitation_health/Globassessment/ (Geo-2-123).
- [22] PNUD, PNUE, Banque mondiale et WRI (2000). World Ressources 2000-2001. Washington, Institut des Ressources mondiale.
- [23] EL GUAMRI Y., BELGUYTI D. *Etude de la qualité physicochimique des eaux usées brutes de la commune urbaine de Saknia, rejetées dans le lac Fouarate (Maroc)*. Journal Africain des Sciences de l'Environnement, 2006, n°1 : 53-60.
- [24] SCHERN P.A.G.M., KROEZE C., JANSSEN F.J.J.G., HORDIJK L., PTASINSKI K.J. *Integrated water pollution assessment of the Ebrié lagoon*. Journal of marine systems 2004 : 44 1-17.
- [25] *Plan stratégique d'assainissement de Ouagadougou: une approche holistique aux problème d'une ville*. Programme pour l'eau et assainissement-Afrique (PEA-AF). Disponible sur le site: <http://www.wsp.org>

- [26] MICHAEL S.K. *Managing the water quality of the Kafue River*. Pergamon Physics and chemistry of the Earth, 2003, 28: 1105-1109.
- [27] PETTER U.T. INGRI J. *The geochemistry of Co and Cu in the Kafue River as it drains copperbelt mining area, Zambia*. Chemical geology, Elsevier 177, 399-414.
- [28] ASONYE C.C., OKOLIE N.P., OKENWA E.E. et IWUANYANWU U.G. *Some physico-chemical characteristics and heavy metal profiles of Nigeria rivers, streams and waterways*. African Journal of Biotechnology Vol. 6 (5), 2007, 617-624.
- [29] HANNINGTON W.O., FRED W.B., HEINZ L., MARKUS W. and REINHARD B. *Pollution menacing Lake Victoria: Quantification of point sources around Jinja Town, Uganda*. Water SA Vol. 34, 2008, 89-98.
- [30] KANDASAMY G.M, HIMANSU B., FLORENCE A.S-A, SAROJA M. and SATHIANATHAN R.C. *Determination of Cr, Pb and Ni in water, sludge and plants from settling ponds of a swage treatment works*. Water 2007, SA Vol. N°33 : 723-728.
- [31] MASSUEL S. *Modélisation hydrodynamique de la nappe phréatique quaternaire du bassin du lac Tchad*. DEA Sciences de l'eau dans l'environnement continental. Université de Montpellier II, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse 2001, 85p.
- [32] DJORET D. *Etude de la recharge de la nappe du Chari Baguirmi par la méthode chimique et isotopique*. Thèse de doctorat Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse ; 2000, 161p
- [33] Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement, Tchad HCE/MEE/ONU-DAS/PNUD 2003-2020
- [34] BLANCHE J. *Les poissons du bassin du Lac Tchad et du bassin adjacent du Mayo Kebbi, étude systématique et biologique*-ORSTOM, Paris
- [35] EMMANUEL E., PERRODIN Y., KECK G., BLANCHARD J-M, VERMANDE P. *Ecotoxicological risk assessment of hospital wastewater: a proposed framework for raw effluents discharging into urban sewer network* Elsevier Journal of Hazardous Materials A, 2005, 117: 1-11

- [36] ROSSILLON J. *Dynamique des populations de macroinvertébrés benthiques d'une rivière Samonicole (Samson) : Approche des facteurs régulateurs*. Thèse de doctorat. Univ. Notre Dame de Paris, Nemur, 199p.
- [37] FRESENIUS W., SCNEIDER W., BOHNKE B., POPPINGHAUS K. *Technologie des eaux résiduaires. Production, collecte, traitement et analyse des eaux résiduaires*. Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Springer-Verlag 1990, 1137p.
- [38] KUNWAR P.S., AMRITA M., SARITA S. *Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques-a case study*. Elsevier Analytica Chimica Acta, 2005, 538 : 355-374.
- [39] CADILHAC L., HENRY C., FOURNIER I., MARCHET P., VALLEE K., BONNEFILLE M., CHERY L. *Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines SEQ-Eau souterraines. Rapport de présentation Version 0.1-Août 2003* 75p.
- [40] HAZOURLI S., BOUDIBA L., ZIATI M. *Caractérisation de la pollution des eaux résiduaires de la zone industrielle d'El-Hadjar, Annaba*. Larhyss Journal, 2007, 1112-3680, n°6 : 45-55
- [41] CCMRE (Conseil canadien des ministres des ressources et de l'environnement) *Oxygène dissous (eau douce)*. Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux: protection de la vie aquatique. 1999, 7p.
- [42] DOUDOROFF, O. et SHUMWAY D.L. *Dissolved oxygen requirements of freshwater fishes*. FAO Technical Paper. Food Agriculture Organization, Nations Unies, Rome, 1970, n°86.
- [43] ALABASTER J.S. et LLOYD R. Food and Agriculture Organization, Nations Unies. Butterworths, 1982, *Water fish*. 2e éd.
- [44] ALDERDICE, D.F., WICKETT N.P. et BRETT J.R. *Some effects of temporary exposure to low dissolved oxygen levels on Pacific salmon eggs*. J. Fish. Res. Board Can. 1958, 15: 229-249.
- [45] SPOOR, W.A. *Oxygen requirements of embryos and larvae of the largemouth bass, Micropterus salmoides (Lacepede)*. J. Fish. Biol. 1977, 11:77-86.

- [46] SILVER S.J., WARREN C.E. et DOUDOROFF P. *Dissolved oxygen requirements of developing steelhead trout and Chinook salmon embryos at different water velocities*. Trans. Am. Fish. Soc. 1963, 92: 327–343.
- [47] BROOKE, L.T. et COLBY P.J. *Development and survival of embryos of lake herring at different constant oxygen concentrations and temperatures*. Prog. Fish-Cult. 1980, 42: 3–9.
- [48] JAMES C.W., MATTHEW S., ROBERT P.G., BARBARA S.S. *Toxic chemicals and trace metals from urban and rural Louisiana lakes: recent historical profiles and toxicological significance*. Environment science & technology, 1995, 29, 8 : 1436-1445
- [49] AURELIE D. *Caractérisation des risques induits par les activités agricoles sur les écosystèmes aquatiques*. Thèse de doctorat. ENGREF de Montpellier, 2004, 239p.
- [50] BINNING K and BAIRD D *Survey of heavy metals in the sediments of the Swartkops River Estuary, Port Elizabeth, South Africa*. Water SA, 2001, 27 (4) :461-466.
- [51] BRYAN G.W and LANGSTON W.J (1992) *Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review*. Environ. Pollut. 76 89-131.
- [52] GARRET G.G. *Natural sources of metals to the environment*. Human and Ecological Risk Assessment, 2000, 6(6) :945-963
- [53] BLANQUET J.P., BONNOMET V., COQUERY M., GANDILLOT A., GONDELLE F., HOUEIX N., LE GOFF F., MAGAUD H., MEUNIER L., SAUCHEZ W. *Devenir et comportement des métaux lourds dans l'eau: biodisponibilité et modèle BLM*. Rapport technique, 2004, 87p.
- [54] DAVYDOVA S. *Heavy metals as toxicants in by cities*, Microchemical Journal, 2005, 79: 133-136.
- [55] GERARD M. *Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé*. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques n° 2978 pp 365.

- [56] JAMES P.H., MARTIN M.S., SUSAN E.C., OVERDIER J.T., PETER E.H., DAVID E.A. *Trace metal assessment of lake Michigan tributary using low-level techniques*. Environment Science & Technology, 1996, vol 3, n°6: 2093-2098.
- [57] CALMANO W., HONG J., FORSTNER U. *Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential*. Water Sciences and Technology, 1993, 28, 8-9 : 223-235.
- [58] LYDIA L., CHRISTELLE R., OTAVIO G., FABIENNE B. *Répartition des métaux lourds dans les différentes fractions des sédiments marins: influence de la protection cathodique*. Géochimie, C.R. Géoscience, 2007, 339: 31-39.
- [59] ABOLLINO O., ACETO M., MALANDRIO M., MENTASTI E., SARZANINI C., BARBERIS R. *Distribution and mobility of metals in contaminated sites, Chemometric investigation of pollutants profiles*. Environ. Pollut. 2002, 119 : 177-193.
- [60] AURELIE D. *Caractérisation des risques induits par les activités agricoles sur les écosystèmes aquatiques*. Thèse de doctorat. Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts Montpellier, 2004, 269p.
- [61] TALIDI A. *Etude de l'élimination du chrome et du bleu de méthylène en milieux aqueux par adsorption sur la pyrophyllite traitée et non traitée*. Thèse de doctorat, Université Mohammed V-Agdal Rabat, 2006, 141p.
- [62] LI-JYUR T., KUANG-CHUNG Y., SHIEN-TSONG H. *Cadmium distribution in sediment profiles of the six main rivers in southern Taiwan*. Journal of Hazardous Materials 2007, 148 : 630-639.
- [63] AMAL S., ABDELLAH E., LARBI I., LATIFA M., MAHAMMED F. et EL HOUSSINE Z. *Evaluation de la contamination métallique des sédiments du complexe zones humides de la ville de Mohammedia (Maroc)* Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Science de la Vie, 2001, n° 23, 77-81.
- [64] SERPAUD B., AL-SHUKRY R., CASTEIGNAU M., MATEJKA G. *Adsorption des métaux lourds par les sédiments superficiels d'un cours d'eau: rôle du pH, de la température et de la composition du sédiment*. Revue des sciences de l'eau, 1974, 7: 343-365.

- [65] BADMUS M.A.O., AUDU T.O.K. and ANYATA B.U. *Removal of heavy metal from industrial wastewater using hydrogen peroxyde*. African Journal of Biotechnology Vol. 6 (3), 2007, 238-242.
- [66] SOFIA A. C., SANDRA F., MARGARIDA M.Q., LICINIO M. F. *Removal of chromium from electrolytating industry effluent by ion exchange resins*, Journal of Hazardous Materials, 2007, 144: 634-638.
- [67] FORSTNER U. and WITTMANN G.T.W. *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, New York, 1979, 289 p.
- [68] TESSIER A., CAMPBELL P.G.C., CARIGNAN R. *Influence du pH sur la spéciation et la biodisponibilité des métaux*. T.S.M-L'EAU, 1990, 69-73.
- [69] INERIS. *Approches analytiques pour l'évaluation de la biodisponibilité des métaux dans les milieux aquatique*. Rapport technique 2003, 89p.
- [70] INERIS. *Utilisation d'une technique de biosurveillance pour évaluer les retombés des métaux lourds, cas d'un site de seconde fusion du plomb*. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2004, 66p.
- [71] CAROLE C., DELPHINE L., JEAN-PIERRE T. ANNE G. BENEDICTE B. et VINCENT B. *Les micropolluants dans l'eau*. Disponible sur le site : <http://environnement.wallonie.be>
- [72] XAVIER C. *Dynamique de transfert du cadmium et du zinc au sein des dépôts de sédiments de curage végétalisés*. Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005. 182p.
- [73] DAVET P. *Vie microbienne du sol et production végétale*. Paris: INRA, 1996, 383p.
- [74] LOEZ C.R. SALIBIAN A. et TOPALIAN M.L. *Associations phytoplanktoniques indicatrices de la pollution par le zinc*. Revue des sciences de l'eau, Rev. Sci. Eau, 1998, 3 : 315-332.
- [75] DELIA T.S. *Toxicity studies in a chemical dye production industry in Turkey*. Elsevier Journal Hazardous Materials A, 2006, 138 : 438-447.

- [76] CNRS *Métaux lourds : des bilans en mutation*. Rapport de synthèse, Programme PIREN-Seine 2002 : 78p.
- [77] PARKS J.W., SUTTON J.A. TOWNSEND B.E. *Water column methylmercury in the Wabigoon/English River-Lake System: factor controlling concentrations, speciation and net production*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, 1989, 46: 2184-2202.
- [78] DRISCOLL C.T., BLETTE V., YAN C., SCHOLFIELD C.L., MUNSON R., HOLSAPPLE J. *The role of dissolved organic carbon in the chemistry and bioavailability of mercury in remote Adirondack lakes*. Water, Air and Soil Pollution, 1995, 80: 499-508.
- [79] BROSSET C. *The behaviour of mercury in the physical environment*. Water, Air and Soil Pollution, 1987, 34: 145-166.
- [80] RUDD J.W.M., FURUTANI A., TURNER M.A. *Source of methyl mercury to freshwater ecosystem: a review*. Water, Air and Soil Pollution, 1995, 80 : 697-713.
- [81] PICOT A. *Intoxication de l'organisme par les métaux lourds et autres toxiques. Le mercure, le plomb et le cadmium, trois métaux traces toxiques*. 2003 Conférence ADNO 14p.
- [82] GRIEB T.M., DRISCOLL C.T., GLOSS S.P, SCHOFIELD C.L., BOWIE G.L., PORCELLA D.B. *Factor affecting mercury accumulation in fish in the upper Michigan Peninsula*. Environmental Toxicology and Chemistry. 9, 1990, 919-930.
- [83] *Les métaux lourds*. Disponible sur le site : iocc@cabisco.be
- [84] INERIS. *Le cadmium et ses dérivés. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France*, 2005. 13p.
- [85] RODIER J., LEGUBE B., MERLET N. - *L'analyse de l'eau*. 9e édition, Dunod, Paris, France, 2009, 1526p.
- [86] RICHARD F.C., BOURG A.C.M. *Aqueous geochemistry of chromium. A review*. Water Research, 1991, 25 (7): 807-816.
- [87] PALMER C.D., WITTBRODT P.R. *Processes affecting the remediation of chromium contaminated sites*. Environment Health Perspectives, 1991, 92 : 25-40.
- [88] SAVARY P. *Guides des analyses de la qualité de l'eau*. Techni.Cités, 2003, 283p.

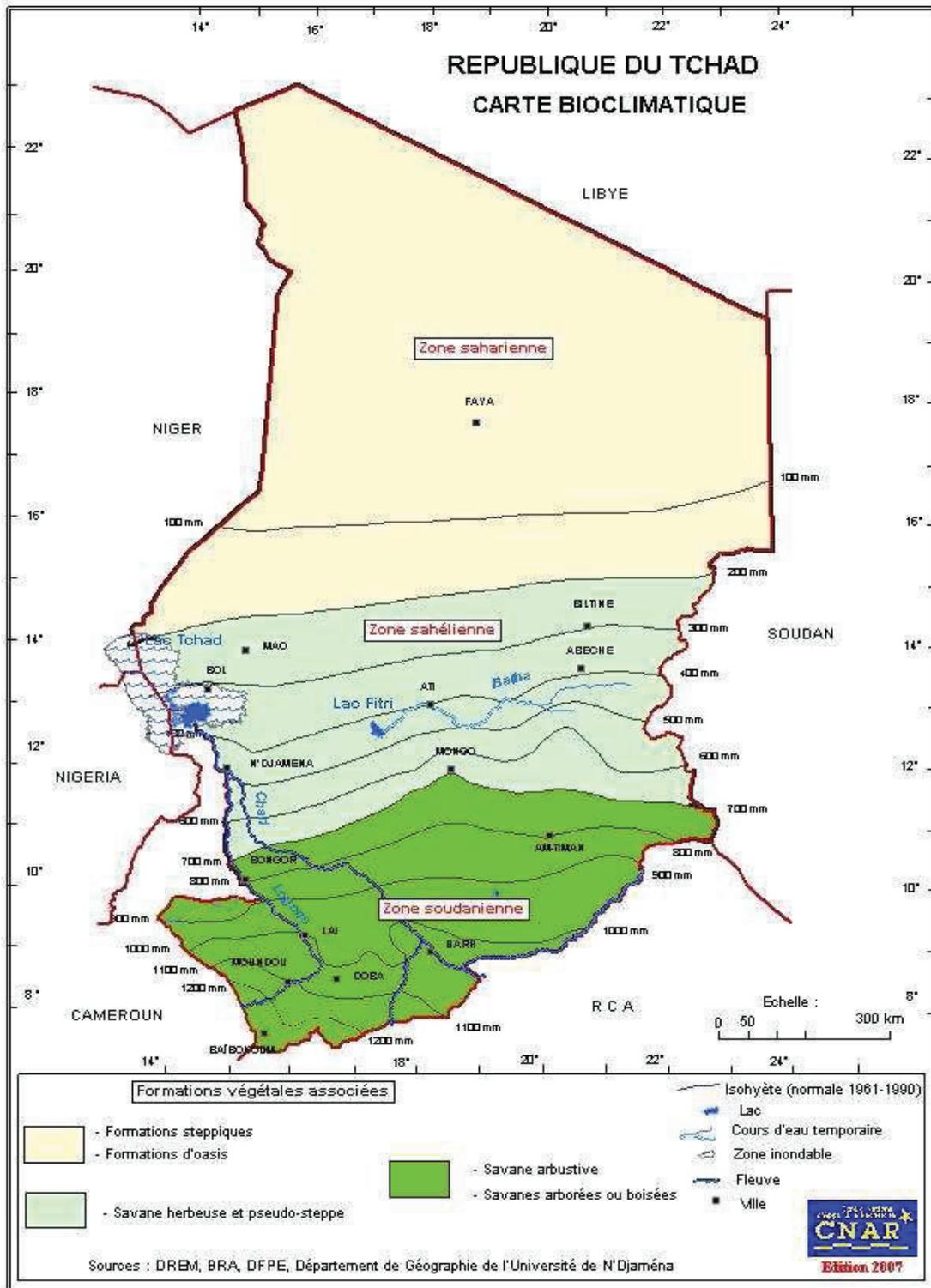
- [89] GHACHI A. *Le bassin de la Seybouse (Algérie). Hydrologie et utilisation de la ressource en eau*. Thèse de Doctorat de 3e cycle, Université de Nancy II, France, 1982, 508p.
- [90] FADEL D., NACER K., SAADANE D., MICHEL R., RAOUL C. *Etude de l'influence de la pollution de l'oued Seybouse sur l'aquifère d'Annaba (Algérie Nord-orientale) par le chrome et le cuivre*. Nappe souterraine. La houille blanche, 2005, n°1 : 73-80.
- [91] MANCUSO T.F. *Consideration of chromium as an industrial carcinogenicity*. Int. Conf. Heavy metals Environment. Toronto, Ont., Canada, 1991,27-31 : 343-356.
- [92] RUIVARD M. *Le fer : un micronutriment essentiel mais un pouvoir toxique potentiel*. Université d'été de Nutrition 2003. Clermont Ferrand. Disponible sur le site : mruivard@chu-clermontferrand.fr
- [93] INERIS *Nickel et ses dérivés*.- Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 2006.
- [94] SUDERMAN F. W., HOPFER S.M., SWEENEY K.R., MARCUS A.H., MOST B.M. and CREASON J. *Nickel absorption and kinetics in human volunteers*. Proc Soc Exp Biol Med, 1989, 191 : 5-11.
- [95] ROMEO M. - *Toxicologie des métaux traces dans l'environnement marin*. Océanis1991, 17,4: 343-402.
- [96] ZEVENHUIZEN L.P.T.M., DOLFINA J., ESHUIS E.J. et SCHOLTEN K.I.J. *Inhibitory effects of copper on bacteria related to the free in concentration*. Microbial ecology5, 139p.
- [97] INERIS. *Zinc et ses dérivées*-fiche de données toxicologiques et environnementales chimiques, 2005.
- [98] Méthodes d'Analyses, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parc du Québec.
- [99] GUY BARROIN. *La pollution des eaux par les phosphates*. La Recherche, 1990 ; vol. 21 ; n°221 : 620-627.
- [100] ETUDES DES AGENCE DE L'EAU *Le SEQ-Eaux souterraines*. Rapport de présentation (Version 0) N° 80 ISSN : 1161-0425 66p

- [101] CADILHAC L., HENRY C., FOURNIER I., MARCHET P., VALLEE K., BONNEFILLE M., CHERY L. Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraine SEQ-Eau souterraines. Rapport de présentation Version 0.1-Août 2003 75p.
- [102] MEHDI M. M., BELABBED B.E., DJABRI L., HANI A.L.R. *Caractéristique de la charge publique de la ville de Tiaret et son impact sur la qualité des eaux souterraines*. Courrier du savoir, Juin 2007, n°8 : 3-99.
- [103] PETRA PÜTZ. *Rapport d'application. Analyse de laboratoire. Métaux lourds*. Disponible sur le site : www.hach-lange.com
- [104] BREMOND R. et VUICHARD R., *Paramètres de la qualité des eaux*. Ministère de la Protection de la Nature et de l'Environnement, 1973, 179p.
- [105] NATHALIE MARY. *Caractérisation physicochimique et biologique des cours d'eau de la Nouvelle-Calédonie. Proposition d'un indice biotique fondé sur l'étude des macros invertébrés benthiques*. Thèse de doctorat, Université française du Pacifique, 1999, 200p.
- [106] CAMAIL M., MAHAMENE M., PUCCI B., RIGAUD J-P. *Analyse chimique des eaux du fleuve Niger à Niamey*. Hydrol. Continent, 1987, n° 2 : 87-99.
- [107] NDEP R. *Pollution physicochimique et microbiologique d'un hydrosystème en milieu urbain : cas de l'Abiergue (Yaoundé II)*. Mémoire DESS Science de l'Environnement Université Yaoundé I 2001-2002.
- [108] MONKOLO J., LARAQUE A., OLIVRY J-C., BRIQUET J-P. *Transport en solution et en suspension par le fleuve Congo (Zaire) et ses principaux affluents de la rive droite*. Hydrological Sciences-Journal-des sciences hydrologiques, 1993, 38, 2, 4 : 133-145.
- [109] DIAWARA C.K., ESSI-TOME H., LHASSANI A., PONTIE M., BUISSON H. *Filtrations membranaires et qualité de l'eau de boisson en Afrique : cas de fleuve Sénégal*, MSAS, 2004, 11p
- [110] MAIGA H., MARIE J., MORAND P. *Avenir du fleuve Niger*. IRD 2007, 103p.
- [111] SAMIRA A., MOHAMMED EL H. et MARC L. *Cuivre, plomb, fer et manganèse dans le bassin du Sebou ; source d'apport et impact sur la qualité des eaux de surface*. Water Qual. Res. J. Canada, 2002 vol. 37, n°4: 773-784.

- [112] BEN BOUIH H., NASSALI N, LEBLANCS M., ET SRHIRI A. *Contamination en métaux traces des sédiments du Lac Fouarat (Maroc)*. Afrique Science, 2005, 01 (1) :109-125.
- [113] BERROW ML, WEBBER J. Trace elements in sewage sludges. J. Sci. Food. Agric., 1972, 23 :93-100
- [114] VALARION F., *Gestion des eaux, alimentation en eau, assainissement*. Presse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées, Paris-France, 1989, 505p.

ANNEXES

ANNEXE 1



Carte Bioclimatique CNAR, 2007

ANNEXE 2 : Cadre législatif et réglementaire

- **La réglementation des pollutions et des nuisances à l'environnement du Ministère de l'Environnement et des Ressources Halieutiques : Décret N° 904/PR/PM/MERH/2009.**

Selon la loi 14/PR/98 définissant les principes généraux de la protection de l'Environnement, le terme « pollution » est défini comme étant « toute contamination ou modification directe ou indirecte de l'environnement provoquée par tout acte susceptible d'entraîner une gêne ou un danger pour la santé, la salubrité publique, la sécurité ou le bien être des personnes ou une atteinte ou des dommages à l'environnement ou aux biens ».

L'article 147 du décret N° 904/PR/PM/MERH/2009 portant réglementation des pollutions et des nuisances à l'environnement stipule : « les effluents liquides et gazeux des industries ne peuvent rejoindre le milieu naturel qu'après avoir subi un traitement approprié ». Les analyses physicochimiques envisagées dans le cadre de nos travaux n'ont pas vérifié l'application de cette disposition légale. Les eaux rejetées au milieu naturel ne doivent pas être de nature à porter atteinte à la santé publique et ne doivent pas compromettre l'équilibre chimique et biologique du milieu.

L'article 146 annonce « une liste des substances toxiques contenues dans les rejets liquides et gazeux [...] établie par un arrêté conjoint du Ministre en charge de l'Environnement et du Ministre en charge de la Santé Publique ». L'alinéa 1 de cet article fait état de « normes physiques, chimiques, microbiologiques des rejets ». Cette liste reste attendue. Ainsi en absence des normes nationales, les résultats des analyses ont été comparés aux normes de l'OMS et aux normes françaises.

L'article 150 du même décret annonce quant à lui : « les points de rejet des effluents liquides dans les eaux superficielles doivent être localisés [...] le choix de leurs emplacements doit tenir compte de la proximité de points de captage d'eau potable, de baignades, de zones piscicoles et maraichères ». Des études d'impact doivent être faites pour s'assurer de l'innocuité des produits rejetés vis-à-vis du milieu récepteur. Ceci pour caractériser les dangers potentiels de ces rejets sur l'environnement afin d'effectuer des déclarations ou des autorisations.

- **Code de l'eau : Loi n°016/PR/99**

La loi n°016/PR/99 du 18 août 1999 encadre la gestion des eaux fluviales, lacustre ou souterraines, et celle de l'exploitation et des ouvrages hydrauliques (article 1). La loi reconnaît les ressources en eau comme étant un bien collectif faisant partie intégrante du domaine public. Leur mise en exploitation est soumise aux lois et règlements en vigueur et dans le respect du droit coutumier. La première disposition environnementale apparaît à l'article 20 concernant la création de périmètre de protection dans le but d'assurer la sauvegarde de la ressource eau destinée à l'alimentation humaine, animale ou à l'agriculture, des risques de pollution en provenance d'instillations ou d'aménagements établis à proximité. Ensuite l'article 35 indique que les personnes bénéficiant du droit d'utilisation du domaine public et de captage des eaux sont tenues de s'abstenir d'endommager l'environnement naturel. Par ailleurs, les articles 114 à 118 informent des dispositions en matière de lutte contre la pollution des eaux par déversements, écoulements, rejets, dépôts, et tout fait susceptible de provoquer ou d'accroître la dégradation des eaux en modifiant leurs caractéristiques. Les mesures de protection contre la pollution des cours d'eau, canaux et lacs navigables seront déterminées par décret (article 122 toutefois, l'article 130 indique déjà la perception des frais de dossier et de redevance concernant l'article 117 portant sur le respect de la réglementation et l'autorisation préalable avant l'altération de la qualité de l'eau superficielle ou souterraine par un déversement ou toutes autres formes de pollutions directes ou indirectes.

- **Schéma Directeur de l'Eau et Assainissement (SDEA, 2002)**

Le « principe 10 de la gestion de l'eau dans la protection de l'environnement » du Schéma Directeur de l'Eau et Assainissement (SDEA), document de référence en matière de politique de l'eau au Tchad stipule que : les impacts des activités économiques sur le domaine hydraulique, ceux du développement de la mobilisation et des usages de l'eau en tant que ressource naturelle, doivent être examinés et traités dans la perspective de la protection des écosystèmes aquatiques du Tchad et de l'environnement en général. Le principe de pollueur-payeur doit être appliqué.

ANNEXE 3 : La grille Multi-usages donnant les critères d'appréciation globale de la qualité de l'eau
(Source : Radou, 1995 pp. 104 et 105)

Cette grille fixe 5 classes de qualité selon les usages que doit satisfaire les rivières. Chaque classe regroupe les valeurs de plusieurs paramètres.

Classes	Caractéristiques
Classe 1A	Elle caractérise les eaux considérées comme exemptes de pollution et aptes à satisfaire les usages les plus exigeants en qualité.
Classe 1B	D'une qualité légèrement moindre, ces eaux peuvent néanmoins satisfaire tous les usages.
Classe 2	Qualité « passable » : suffisante pour l'irrigation, les usages industriels et la production d'eau potable après un traitement poussé. L'abreuvement des animaux est généralement toléré. Le poisson y vit normalement mais sa reproduction peut être aléatoire.
Classe 3	Qualité « médiocre » : juste apte à l'irrigation, au refroidissement et à la navigation. La vie piscicole peut subsister dans ces eaux mais elle y est aléatoire en période de faibles débits ou de fortes températures, par exemple.
Classe > 3	Eaux dépassant la valeur maximale tolérée en classe 3 pour un ou plusieurs paramètres. Elles sont considérées comme inaptes à la plupart des usages, et peuvent constituer une menace pour la santé publique et l'Environnement.

Paramètres	Classe 1A	Classe 1B	Classe 2	Classe 3
Conductivité (µS/cm)	≤ 400	400 à 750	750 à 1500	1500 à 3000
Température (°C)	≤ 20	20 à 22	22 à 25	25 à 30
pH	6,5 à 8,5	6,5 à 8,5	6 à 9	5,5 à 9,5
(mg/l)	≤ 30	≤ 30	≤ 30	30 à 70
O ₂ dissous (mg/l)	➤ 7	5 à 7	3 à 5	Milieu aérobie à maintenir en permanence
O ₂ dissous (en % de saturation)	➤ 90 %	70 à 90	50 à 70	
DBO ₅ (mg/l)	≤ 3	3 à 5	5 à 10	10 à 25
Oxydabilité (mg/l)	≤ 3	3 à 5	5 à 8	-
DCO (mg/l)	≤ 20	20 à 25	25 à 40	40 à 80
NH ₄ ⁺	≤ 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8
NO ₃ ⁻	-	-	< 44	44 à 100
N total (Kjeldahl)	➤ 1	1 à 2	2 à 3	-
Fe (mg/l)	≤ 0,5	0,5 à 1	1 à 1,5	-
Mn (mg/l)	≤ 0,1	0,1 à 0,25	0,25 à 0,5	-
Cu (mg/l)	≤ 0,02	0,02 à 0,05	0,05 à 1	➤ 1
Ni (mg/l)	≤ 0,02	0,02 à 0,05	0,05 à 1	➤ 1
Zn (mg/l)	≤ 0,5	0,5 à 1	1 à 5	➤ 5
As (mg/l)	≤ 0,01	➤ 0,01	0,01 à 0,05	➤ 0,05
Cd (mg/l)	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,001	➤ 0,001
Cr (mg/l)	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	➤ 0,05
CN (mg/l)	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	➤ 0,05
Pb (mg/l)	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	➤ 0,05
Se (mg/l)	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	➤ 0,01
Hg (mg/l)	≤ 0,0005	≤ 0,0005	≤ 0,0005	➤ 0,0005
Phénols (mg/l)	-	≤ 0,001	0,001 à 0,05	0,05 à 0,5
Détergents (mg/l)	≤ 0,2	≤ 0,2	0,2 à 0,5	➤ 0,5
Coliformes fécaux	≤ 50	50 à 5.10 ³	5.10 ³ à	-

(/100ml)			5.10 ⁴	
Escherichia Coli(/100ml)	≤ 20	20 à 2.10 ³	2.10 ³ à 2.10 ⁴	-
Streptocoques fécaux (/100ml)	< 20	20 à 10 ³	10 ³ à 10 ⁴	-
Ecart de l'indice biotique par rapport à l'indice normal	1	2 ou 3	4 ou 5	6 ou 7

ANNEXE 4 : Photométrie DR 2400 méthode et limite de détection

Paramètre	Méthode	Gamme
Zn	Méthode au zincon Méthode 8009. Pochette de réactif	0,01 à 2,00mg/l
Cu	Méthode au bicinchorinate Méthode 8506 et méthode 8026. Pochette de réactif	0,04 à 5,00mg/l
Pb	Méthode d'extraction rapide à colonne Leadtrak. Méthode 8317	0,005 à 0,15 mg/l
Co	Méthode au 1-(2pyridylazo)-2-Naphtol (PAN) Méthode 8078 Pochette de réactif	0,01 à 2,00 mg/l
Mn	Méthode au PAN Méthode 8149. Pochettes de réactif	0,007 à 0,700 mg/l
Cr	Méthode au 1,5-diphénylcarbohydrazide Pochettes de réactif	0,001 à 0,70mg/l en Cr ⁶⁺
Ni	Méthode au 1-(2pyridylazo)-2-Naphtol (PAN). Méthode 8150 Pochettes de réactif	0,007 à 1,000mg/l
Fe	Méthode au FerroVer . Méthode 8008 Pochettes de réactif	0,02 à 3,00mg/l
SO₄²⁻	Méthode au SulfaVer 4 . Méthode 8051 Pochettes de réactif	2 à 70 mg/l
PO₄³⁻	Méthode au PhosVer3. Méthode 8048 Test 'N Tube	0,006 à 5,00mg/l en PO ₄ ³⁻
NO₃⁻	Méthode de réduction au cadmium Méthode 8171	0,1 à 10,0mg/l en NO ₃ ⁻

