

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE

(Union-Discipline-Travail)

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE COCODY / ABIDJAN



UFR-SSMT

Laboratoire Chimie Physique

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
HOUEHOUET BOIGNY



DRGME / DRE-UCAB
LMDCE / LAPISEN

THESE

Titre: EXPLOITATION DES EAUX DES LACS DE LA VILLE DE
YAMDOUSSOUKRO POUR LE FONCTIONNEMENT D'UNE
CHAUFFERIE INDUSTRIELLE.

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE COCODY / ABIDJAN

Spécialité : GENIE ENERGETIQUE ET INDUSTRIEL

PAP

KRA ESSI KOUADIO FRANCE

Soutenue le 03 décembre 2007, devant le jury composé de :

Rapporteurs : M. DONGUÉ BINIKI, Maître de conférences à l'Ecole Normale Supérieure d'Abidjan
M^{me} KWA-KOFF Edith, Maître de conférences à l'Université de COCODY

Examinateurs : M. BOKRA YEDOU, Professeur à l'Université de COCODY : Président du jury
M. AKICHIAGBOUE, Maître de conférences à YINZIE : Directeur de thèse
M. TROKOURAY Albert, Maître de conférences à l'Université de COCODY

LMDCE : Laboratoire des Machines et Moteurs à Conversion de l'Energie
LAPISEN : Laboratoire des Procédés Industriels et de Synthèse
de l'Environnement et des Energies Nouvelles

A ma mère

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un partenariat entre le Laboratoire de Chimie Physique de l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences des Structures de la Matière et de Technologie (UFR-SSMT) de l'Université de COCODY (Abidjan) et l'Institut National Polytechnique Houphouët Boigny (INPHB) de Yamoussoukro.

Les travaux ont été assurés conjointement par le Laboratoire des Moteurs et Machines à Conversion de l'Energie (L2MCE) du Département de Formation et de Recherche du Génie Mécanique et Energétique (DFR-GME) et le Laboratoire de Chimie de l'Eau du Département de Formation et de Recherche du Génie Chimique et Agro Alimentaire (DFR-GCAA) tous deux situés à l'INPHB, et le Laboratoire Chimie Physique de l'Université de COCODY (Abidjan).

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux directions de tous ces laboratoires qui n'ont pas lésiné sur les moyens pour le succès de cette étude.

Je remercie particulièrement le Professeur BOKRA YOBOU, de l'Université de COCODY, qui m'a recruté à l'école doctorale, diriger les travaux scientifiques et m'a fait l'honneur de bien vouloir accepter de présider le jury de cette thèse.

Toutes mes reconnaissances vont au Professeur AKICHI Agboué, Directeur de thèse, Maître de conférences, à l'INPHB, pour m'avoir accepté dans son laboratoire et pour toute la confiance qu'il m'a témoignée en me confiant cette étude.

Je remercie également le Professeur ADO Gossan, Directeur de L'INPHB et responsable de l'école doctorale à l'INPHB ; le Professeur YAO Benjamin, à l'INPHB, qui a permis que les travaux expérimentaux se déroulent dans le laboratoire qu'il dirige et le Professeur ADIMA Amissa, à l'INPHB, pour avoir guidé les travaux de manipulation. Mes remerciements au Professeur TROKOUREY Albert Directeur du Laboratoire Chimie Physique et au Professeur KWA Koffi Edith, à l'Université de COCODY, tous deux membres du jury ; au Professeur DONGUI, Directeur du Centre de Formation Continue de l'Ecole Normale Supérieure d'Abidjan et membre du jury.

Je n'oublie pas non plus tous les professeurs qui travaillent dans le Laboratoire de Chimie de l'Eau qui ont participé à la réussite de cette œuvre par leurs conseils, en l'occurrence le Professeur SORO Siaka, les Docteurs FANOU Didier et GUEU Soumahoro.

Je remercie particulièrement Docteur KOFFI Firmin pour les derniers conseils qui ont permis d'améliorer le travail.

Mes reconnaissances à M et Mme KOSSONOU, à M. ADJOU MANI, à ma nièce ADJOU MANI Edith, à ma fille ESSI Tamia ainsi qu'à tous mes parents, amis et connaissances.

SOMMAIRE

TABLE DES FIGURES ET PLANCHES

TABLE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1	PRESENTATION DE L'ETUDE	5
I.2	CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DE L'ETUDE DE L'EAU.....	7
I.2.1	GESTION DE L'EAU DANS LE MONDE.....	7
I.2.2	GENERALITES SUR LES EAUX DANS LEUR CONTEXTE PHYSICO- CHIMIQUE.....	9
I.2.3	CONSEQUENCE DE L'EAU SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA CHAUFFERIE INDUSTRIELLE.....	12
I.3	ENVIRONNEMENT DES MILIEUX LENTIQUES EN COTE D'IVOIRE.....	18
I.3.1	LA LAGUNE EBRIE D'ABIDJAN	18
I.4	ENVIRONNEMENT DES LACS DE YAMOISSOUKRO.....	19
I.4.1	SITUATION GEOGRAPHIQUE ET DONNEES HYDROCLIMATIQUES.....	19
I.4.2	ACTIVITES ANTHROPIQUES.....	22
I.4.3	POLLUTION MICROBIOLOGIQUESDES LACS.....	22
I.4.4	EUTROPHISATION DES LACS.....	23
I.4.5	ENVAHISSEMENT PAR LES VEGETAUX AQUATIQUES.....	25
I.4.6	INFLUENCE DES FEUX DE BROUSSE SUR LES LACS.....	30
I.4.7	MODELE MULTIDIMENSIONNEL DE SUIVI DE LA QUALITE DES EAUX DES LACS.....	30
I.5	PRESENTATION DES DIFFERENTS TYPES DE TRAITEMENT DES EAUX	31
I.5.1	TRAITEMENT DES EAUX DE CONSOMMATION HUMAINE.....	32
I.5.2	TRAITEMENT DES EAUX USEES.....	33
I.5.3	TRAITEMENT DES EAUX INDUSTRIELLES.....	34

I.6 PRESENTATION DE LA CHAUFFERIE INDUSTRIELLE.....	46
I.6.1 LES CHAUDIERES.....	46
I.6.2 LES CONDUITES D'EAU.....	50
I.6.3 LES POMPES	51
I.6.4 LES ACCESSOIRES DE SECURITE ET REGULATION.....	53
I.7 CONCLUSION PARTIELLE.....	54

CHAPITRE II

ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICOCHIMIQUES DES LACS

II.1 PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE.....	56
II.1.1 LE SYSTEME LACUSTRE DE LA VILLE DE YAMOOUSSOUKRO.....	56
II.1.2 CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES ET GEOGRAPHIQUES.....	56
II.2 CONDITIONS DE PRELEVEMENT.....	60
II.3 MATERIELS ET METHODES.....	62
II.4 ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	64
II.4.1 EVOLUTION SPATIALE DES PARAMETRES ANALYTIQUES.....	64
II.4.2 EVOLUTION RELATIVE DES PARAMETRES SUR L'ENSEMBLE DES LACS.	76
II.4.3 VARIATION ANNUELLE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DU LAC1	77
II.4.4 EXTENSION DES RESULTATS AUX LACS PERIPHERIQUES.....	79
II.5 CONCLUSION PARTIELLE.....	81

CHAPITRE III

PROPOSITIONS DE TRAITEMENT DES EAUX DES LACS

III.1 PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DES CHAUDIERES.....	84
III.2 PROPOSITION DE TRAITEMENT.....	85
III.2.1 SUIVI ENVIRONNEMENTAL.....	85
III.2.2 TRAITEMENT PHYSICO-CHIMIQUE.....	89

III.3 CONCLUSION PARTIELLE.....	97
--	-----------

CHAPITRE IV

<h1 style="margin: 0;">EXPLOITATION DES EAUX DANS UNE CHAUFFERIE INDUSTRIELLE</h1>
--

IV.1 DIMENSIONNEMENT DES DIFFERENTS ORGANES DE L'INSTALLATION	99
IV.1.1 PRESENTATION GENERALE DES INSTALLATIONS.....	99
IV.1.2 DIMENSIONNEMENT DU CIRCUIT DE TRAITEMENT.....	100
IV.1.3 DIMENSIONNEMENT DU CIRCUIT VAPEUR.....	106
IV.2 ANALYSE ECONOMIQUE ET CHOIX DU PROCEDE DE TRAITEMENT.....	119
IV.2.1 ANALYSE DES COUTS ET DES AVANTAGES DE L'ADDITION ET DE L'ADOUCCISSEMENT.....	120
IV.2.2 COMPARAISON DES QUALITES DE PRODUCTION DES DIFFERENTS PROCEDES.....	123
IV.2.3 ANALYSE DES COUTS RELATIFS DE FONCTIONNEMENT ET D'INVESTISSEMENT.....	123
IV.2.4 ANALYSE DES COUTS RELATIFS DE TRAITEMENT DU LAC5 ET DE L'EAU DE SODECI.....	124
IV.3 EVALUATION ECONOMIQUE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	127
IV.3.1 LE PRINCIPE DE RATIONALITE ECONOMIQUE.....	127
IV.3.2 LE PRINCIPE DE COMPARAISON DES COUTS ET DES AVANTAGES.....	128
IV.4 EXPLOITATION DU LAC5.....	128
IV.4.1 POUR LE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE THERMIQUE.....	128
IV.4.2 POUR DES BESOINS SANITAIRES.....	136
IV.4.3 POUR DES BESOINS DE CHAUFFAGE.....	137
IV.5 CONCLUSION PARTIELLE.....	139
CONCLUSION GENERALE.....	141
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

TABLE DES FIGURES

Figure.1.1 : Installation d'une chaufferie à vapeur	5
Figure1.2 : Structure de la molécule d'eau.....	10
Figure I.3 : Principe de l'adoucissement par échange d'ions.....	37
Figure1.4 : Principe de la décarbonatation sur résines avec adoucissement.....	38
Figure 1.5 : Principe de la déminéralisation totale	39
Figure 1.6 : Principe d'alimentation de la chaudière en eau.....	46
Figure 1.7 : coupe d'une chaudière à tubes de fumées.....	47
Figures 1.8 : Coupe d'une chaudière à tube d'eau.....	48
Figure 1.9 : Schéma d'un dégazeur et d'une bache alimentaire avec système de protection ..	49
Figure 1.10 : Schéma simplifié d'une installation de pompage.....	50
Figure 1.11 : Circuit de chauffage avec organes de régulation et de sécurité.....	52
Figure 2.1 : Température des lacs	62
Figure 2.2 : potentiel d'Hydrogène.....	63
Figure 2.3 : Evolution de l'oxygène dissous, de l'IPEB et des ions chlorures.....	65
Figure 2.4 : Evolution ddp ; conductivité et pH.....	66
Figure 2.5 : Evolution des ions Ca^{2+} ; Mg^{2+} et K^+	67
Figure 2.6 : Titre alcalimétrique complet.....	68
Figure 2.7 : Evolution des MES et du NTU.....	69
Figure 2.8 : Concentration en ions sulfates.....	70
Figure 2.9 : Concentration en ions chlorures.....	70
Figure 2.10: Azote ammoniacal NH_4^+	71
Figure 2.11: Ions nitrates.....	71
Figure 2.12 : Ions phosphates.....	72
Figure 2.13 : Evolution journalière du pH	73
Figure 2.14 : Evolution journalière de la température.....	73
Figure 2.15 : Evolution journalière de l'oxygène dissous.....	74
Figure2.16 : Variation de l'écart réduite de la température sur une année dans le lac1.....	75
Figure2.17 : Variation de l'écart réduite du pH sur une année dans le lac1.....	76
Fig.2.18 Variation de l'écart réduite des MES sur une année dans le lac1.....	76
Figure 2.19 : Variation de l'écart réduite du calcium sur une année dans le lac1.....	77

Figure 2.20 : Corrélation entre le TDS et le TH.....	78
Figure 2.21 : Corrélation entre le TDS et le TAC.....	79
Figure 3.1 : Processus de l'assainissement collectif.....	83
Figure 3.2 : Principe des stations extensives d'épuration.....	64
Figure 3.3 : Processus de l'assainissement in situ (individuel).....	85
Figure 3.4 : Processus de traitement de l'eau.....	86
Figure 3.5 : Comparaison THMg et TH-TAC.....	88
Figure 3.6 : Principe du Chaînage Cf-CF-DEG	89
Figure 3.7 : Principe du chaînage CF-DEG-AF.....	89
Figure 3.8 : Principe du Chaînage Cf-CF-DEG avec régénération.....	90
Figure 3.9 : Dose de chaux à appliquer à chaque lac.....	92
Figure 4.1 : Circuit de production de vapeur pour une centrale thermique.....	94
Figure 4.2 : Circuit de production de vapeur pour chauffage ou cuisson.....	95
Figure 4.3 : principe d'un réservoir de stockage.....	97
Figure 4.4 : Coupe d'une colonne d'échange d'ions à co-courant.....	101
Figure 4.5 : Schéma d'installation d'une pompe en charge.....	107
Figure 4.6 : Schéma d'installation d'une pompe au refoulement.....	108
Figure 4.7 : Plage de débits possibles de la pompe	109
Figure 4.8 : Principe de rendement global d'un couplage moteur-pompe.....	111
Figure 4.9: Abaque des types de pompes en fonction de la vitesse spécifique.....	113
Figure 4.10 : Efficacité des procédés de traitement.....	118
Figure 4.11: Coûts relatifs d'investissement et de fonctionnement des procédés.....	119
Figure 4.12 : coûts relatifs d'adoucissement des eaux du lac 5 et de la SODECI.....	120
Figure 4.13 : Coûts de décarbonatation-adoucissement (lac5 et SODECI).....	121
Figure 4.14 : Coût de déminéralisation totale (lac5 et SODECI).....	121
Figure 4.15 : Installation d'une centrale thermique.....	124
Figure 4.16: Circuit de Prétraitement	127
Figure 4.17 : Schéma de déminéralisation (lac5).....	128
Figure 4.18 : coût relatif d'adoucissement et de décarbonatation du lac5.....	130
Figure 4.19 : Qualité de l'eau produite par décarbonatation/adoucissement.....	131
Figure 4.20 : Schéma d'installation du circuit de chauffage d'eau pour hôpital.....	131
Figure 4.21: Schéma d'installation du circuit de chauffage d'eau pour hôtel.....	133

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 caractéristiques principaux de l'eau.....	10
Tableau 1.2 : Principaux sels dissous dans une eau de mer de salinité 35g/kg	11
Tableau 1.3 : Tartre et corrosion dans l'eau.....	12
Tableau 1.4 : Risques et inconvénients de l'eau brute sur la chaufferie	16
Tableau 1.5 : Degré de pollution biochimique des lacs	21
Tableau 1.6 : Degré de pollution microbiologique des lacs en UFC/ml.....	22
Tableau 1.7 : Densités relatives (par lac) des principaux groupes taxonomiques présents dans les lacs 1,5 et 7.....	25
Tableau 1.8 : Valeurs des seuils du système fixe de classification des états trophiques.....	30
Tableau 1.9 : Gaz solubles dans l'eau d'alimentation.....	33
Tableau 1.10 : Solides en suspension dans l'eau d'alimentation.....	34
Tableau 1.11 : Solides colloïdaux dissous dans l'eau d'alimentation.....	35
Tableau 1.12 : Avantages et inconvénients des pompes centrifuges.....	51
Tableau 1.13 : Avantages et inconvénients de pompes volumétriques.....	52
Tableau 2.1 : Hauteurs de pluie mensuelle en mm à Yamoussoukro.....	55
Tableau 2.2 : Superficie des lacs et des bassins versants.....	56
Tableau 2.3 : Description de l'environnement des lacs	57
Tableau 2.4 : Description de l'environnement des lacs 11 à 18.....	58
Tableau 2.5 : Analyses et traitement des données.....	60
Tableau 2.6 : Paramètres physico-chimiques des lacs 11 à 18.....	79
Tableau 3.1 : Comparaison du THMg et du TH-TAC.....	91
Tableau 3.2 : Teneur en CO ₂ libre des lacs.....	92
Tableau 3.3: Dose de chaux à appliquer à chaque lac.....	92
Tableau 4.1 : coûts de l'addition de tartre.....	116
Tableau 4.2 : Coûts de d'adoucissement.....	117
Tableau 4.3 : Fiche d'analyse du lac 5.....	125
Tableau 4.4 : caractéristiques colloïdales des lacs 1 et 5 avant et après prétraitement.....	128

Tableau 4.5 : Volume des résines.....	129
Tableau 4.6 : Capacités des résines.....	129
Tableau 4.7 : Comparaison des paramètres physico-chimiques après traitement.....	130
Tableau 4.8 : Résultats du dimensionnement de l'installation de la centrale thermique....	130
Tableau.4.9 : Récapitulatif des caractéristiques des trois installations	132

TABLE DES PLANCHES

Planche I : plan des lacs de la ville de Yamoussoukro.....	20
Planche II : Vue photographique des lacs de Taabo et de Kossou.....	26
Planche III : Vue photographique des lacs 5 ; 6 et 7 de Yamoussoukro.....	27
Planche IV : Vue photographique de lacs 8 ; 9 et 10 de Yamoussoukro.....	28
Planche V : Plan des points de prélèvements des lacs de Yamoussoukro.....	59

NOMENCLATURE

Abbréviations

NTE:	<i>Nitrite Nitré</i>
COT:	<i>Carbone Organique Total</i>
REI:	<i>Eaux Résiduaires Industrielles</i>
REI:	<i>Eaux Résiduaires Industrielles</i>
EPL:	<i>Eau Pluviale</i>
DB5:	<i>Demande Biochimique en Oxygène sur cinq jours</i>
DCO:	<i>Demande Chimique en Oxygène</i>
NO₂:	<i>ion nitrite</i>
NO₃:	<i>ion nitrate</i>
EA:	<i>Eau d'Arrière</i>
EA:	<i>Eau d'Arrière</i>
SEA:	<i>Système Autonome de Eau Potable</i>
SA:	<i>Système Autonome de Eau Potable</i>
TAC:	<i>Titre Alcalimétrique Correcté</i>
TH:	<i>Titre Hydrométrique</i>
BF:	<i>Bassin Versant</i>
Δφ:	<i>Différence de Potentiel</i>
U₀:	<i>indice de l'organisme de l'Eau Brute</i>
SAE:	<i>Système Autonome de Eau Potable</i>
TDS:	<i>Total dissolved solids</i>
AFAGE:	<i>Association des Propriétaires d'Unité Electrique et de Vapeur</i>
AMBA:	<i>Association Américaine des Maires de l'Ontario</i>
OCIO:	<i>Organisation de Coopération et de Développement Economiques</i>
OMS:	<i>Organisation Mondiale de la Santé</i>
CS:	<i>Classe Facile</i>
CF:	<i>Classe Facile</i>
AF:	<i>Arrière Facile</i>
AF:	<i>Arrière Facile</i>
DZO:	<i>Décharge</i>
NPEH:	<i>Niveau de Charge Élevée</i>
SOBEC:	<i>Société de Distribution de l'Eau en Côte d'Ivoire</i>
U₀:	<i>indice de l'organisme de l'Eau Brute</i>
AFAGE:	<i>Association Française de Normalisation</i>
ISO:	<i>International Standards Organization</i>
NTU:	<i>Unité Néphélométrique de Turbidité</i>
BF:	<i>Bassin Versant</i>
SBV:	<i>Système Versant</i>
RA:	<i>Région Agricole d'Arrière</i>
SA:	<i>Système d'Assainissement Autonome</i>
MO:	<i>Matière Organique</i>
TA:	<i>Titre Alcalimétrique</i>
TH:	<i>Titre Hydrométrique</i>
EA:	<i>Eau d'Arrière</i>
FC:	<i>Fonce de Circulation d'Eau Traitée</i>
FC:	<i>Fonce Alimentaire de Côte d'Ivoire</i>

RESUME

RESUME

L'objectif de ce travail, réalisé sur le système lacustre tropical de la région de Yamoussoukro est d'étudier l'exploitation des eaux (polluées) pour le fonctionnement et le dimensionnement d'une chaufferie industrielle.

Nous avons estimé que le développement industriel qui est aussi en rapport avec celui de la population des pays en voie de développement doit répondre à une question fondamentale qui est de lutter contre la pollution. En effet la croissance démographique des villes des pays en développement a pour conséquence directe l'augmentation de la pollution des eaux de surface. Cependant, ces eaux doivent servir à plusieurs niveaux, tant pour la consommation, l'agropastorale ainsi qu' à l'alimentation des unités industrielles. La lagune EBRIE d'Abidjan ne sert qu'au transport et peut être considérée comme réservoir des rejets urbains.

Pour mieux aborder la question, nous avons choisi des conditions plus défavorables en l'occurrence 10 lacs pollués de la ville de Yamoussoukro, qui subissent les effets anthropiques comme la lagune EBRIE, pour mener notre étude. Cette étude nous permet d'évaluer théoriquement l'impact de la pollution des eaux sur le développement industriel.

La première partie de cette étude s'est consacrée à l'analyse des paramètres physico-chimiques de 10 des lacs de la ville de Yamoussoukro. Dix huit(18) paramètres ont été analysés sur chaque lac pendant douze (12) mois. Il ressort que les lacs ont une faible minéralisation (conductivité moyenne = $210\mu\text{S}/\text{cm}$). Concernant la pollution organique, l'évaluation montre que les lacs ont une charge organique supérieure à la normale. La teneur de chacun des lacs en matière organique, matières en suspension, le pH et certaines caractéristiques telles que la turbidité, le titre alcalimétrique complet, les ions chlorures...sont influencés par leur environnement immédiat, notamment les activités anthropiques, la concentration des populations et le type de quartier.

La deuxième partie de l'étude propose un processus de traitement et des mesures à prendre pour pouvoir admettre ce type d'eau dans la chaufferie industrielle. Ce processus prend en compte des mesures environnementales pour éviter ou réduire la pollution des lacs. Il prévoit en amont du système de traitement, une chaîne de prétraitement pour éliminer les matières en suspension, les solides, le sable et certains ions tels que les ions chlorures, nitrates... avant la chaîne d'adoucissement ou de déminéralisation. Avec les méthodes

classiques de traitement des eaux (adoucissement, déminéralisation...), on peut alimenter toute sorte de chaudière avec cette eau.

La dernière partie du travail s'est attelée à l'exploitation des ces eaux dans une unité industrielle. Cette partie propose les différentes étapes de dimensionnement des différentes parties de l'installation à savoir les conduites d'eau et de vapeur, les pompes, les décanteurs statiques, les réservoirs de stockage, le volume des résines, le générateur de vapeur.... Cette partie aborde également l'étude économique des différents modes de traitement (décarbonatation, adoucissement, déminéralisation, addition d'antitartre). Il ressort que le coût d'investissement et de fonctionnement de chaque mode de traitement est proportionnel à la charge polluante de l'eau mais le choix de ce mode est fonction de la qualité d'eau voulue à la sortie du traitement. L'étude comparée des coûts des différents procédés dans l'exploitation de deux types d'eaux (l'eau du lac 5 et l'eau de ville) montre que l'eau polluée engendre des coûts d'investissement et de fonctionnement supplémentaires mais ces coûts sont amortissables à court terme. L'utilisation des eaux des lacs (eaux polluées) a des avantages tels que la gratuité, la proximité et l'abondance de l'eau ; de même que l'autonomie énergétique de la structure exploitante vis-à-vis de la société fournisseur de l'eau commerciale.

L'intérêt principal réside dans la gestion des ressources en eaux de la planète. En exploitant exclusivement les eaux polluées (rejets et eaux résiduaires) dans les machines, les eaux propres de surface comme souterraines pourront satisfaire pendant longtemps aux besoins de consommation humaine et agropastorale. Cela permet de ralentir l'épuisement rapide des eaux souterraines qui ne se renouvellent que très lentement à l'échelle humaine.

Mots clés : chaudière, chaufferie industrielle, déminéralisation, adoucissement, pollution, environnement, dimensionnement, coût de fonctionnement, coût d'investissement, décantation, filtration, traitement, prétraitement, lacs, conductivité, dureté.

ABSTRACT

The objective of this work, realized on the tropical lake system of the region of Yamoussoukro is to study use of polluted waters for the working and the dimensionality of an industrial boiler room.

We have estimated that the industrial development of the developing countries must answer a fundamental question that is cohabitation between populations, pollution and industrial development. Indeed the demographic growth of the cities has as direct consequence the pollution of the surface waters. However these waters must serve multilevel, so much for the human consumption, the irrigation... that for the production of steam in industrial units.

To approach the question, we chose the most unfavourable conditions (10 lakes polluted of the city of Yamoussoukro) to lead our survey. This survey allows us to value the impact of the pollution of waters, theoretically on the industrial development.

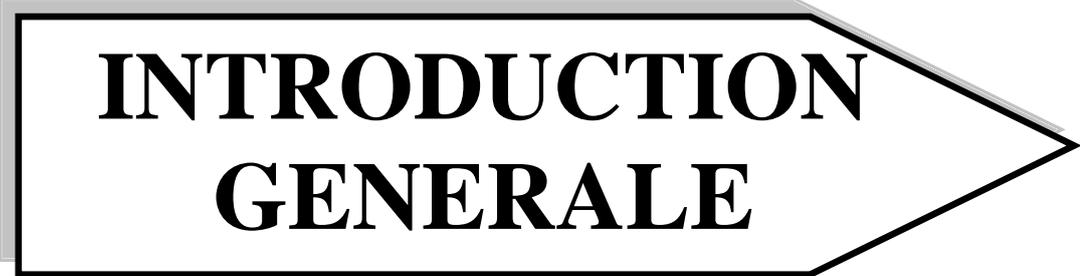
The first left from this survey is the analysis of the physico-chemical parameters of 10 of the lakes of Yamoussoukro's city. About 18 parameters have been analyzed on several months. It comes out again that the lakes have a low mineralization (middle conductivity = $210\mu\text{S/cm}$). Concerning the organic pollution the assessment shows that the lakes have an organic load superior to the normal. The content of each of the lakes in organic matter is influenced by its immediate environment, notably the human activities, the concentration of the populations and the type of district.

The second part of the survey proposes a process of treatment and measures to apply for admitted such water in the industrial boiler room. This process proposes the environmental measures to avoid or to reduce the pollution of the lakes. Then, it previous in the system upstream, a chain of pre-process to eliminate matters in suspension, the solids and some ions as the chlorides ions, ... before the chain of alleviation or demineralization. With the approved methods of treatment of waters (alleviation, demineralization...), we can nourish all sort of boiler room with this water.

The last part of work is the exploitation of the waters in an industrial unit. This part proposes the different stages of dimensionality of the parts of the installation like, the condenser, the turbine, the steam conduct, the pumps, the static decanters, the reservoirs of storage, the volume of the resins, the steam generator.... This part also approaches the economic study of the different processing modes (decarbonatation, alleviation,

demineralization, addition of anti-incrustor). It comes out again that the cost of investment and working of every processing mode is first proportional to the charge of water but the choice that of this mode is function of the quality of the water in the exit of the treatment. The survey compared of the costs of the different processes in the exploitation of two types of waters (a water of the lac5 and commercial water) shows that the polluted water generates some supplementary costs of investment and working but redeemable to short or medium-term.

Key words: Boiler room, industrial boiler room, tropical lake system, dimensionality, pollution, pre-process, process, demineralization, softening, alleviation, redeemable, hardness, conductivity. Investment cost, working cost.



**INTRODUCTION
GENERALE**

INTRODUCTION GENERALE

D'après Paul HAWKEN, une économie a besoin de quatre types de capitaux pour fonctionner convenablement : [1],[2].

- le capital humain, sous forme de travail et d'intelligence, de culture et d'organisation ;
- le capital financier, constitué de liquidités d'investissements et d'instruments monétaires ;
- le capital industriel, comprenant l'infrastructure, les machines, les outils et les usines ;
- le capital naturel, représenté par les ressources naturelles, les systèmes vivants et les services que rend l'écosystème.

Le système industriel utilise les trois premières sortes de capital pour transformer le capital naturel en biens utiles à notre vie quotidienne. Dans cette vie quotidienne, une bonne partie du capital naturel est transformée en énergie.

Les sources d'énergie les plus utilisées aujourd'hui sont le pétrole, le soleil, le vent, l'atome, la biomasse, le gaz, les fonds marins et l'énergie potentielle de l'eau (barrage). Parmi toutes ces sources, le pétrole fournit plus de 31% du capital énergétique mondial et est utilisé dans divers domaines tels que le transport, le chauffage, la chaufferie et l'industrie en général : [3]

La conversion de l'énergie chimique (pétrole) en énergie thermique, mécanique ou électrique, utilisable dans la chaufferie industrielle ou dans le chauffage, se fait à travers un fluide caloporteur. De par ses caractéristiques physiques et chimiques et son abondance dans la nature, l'eau est le fluide caloporteur idéal, et le plus utilisé dans les installations de chaufferie industrielle. Elle devient donc une matière première pour la production de la vapeur d'eau.

L'eau n'existe pas dans la nature à l'état pur (« H₂O »). Pourtant, son utilisation dans les machines nécessite qu'elle soit pure, exempte de toute charge minérale et organique.

La distribution des ressources en eau dans la nature n'est pas faite de manière équitable. L'eau est omniprésente sur la terre. Sans elle, la vie humaine serait impossible. Elle est nécessaire à la vie des végétaux, des animaux et aux activités humaines.

Cependant, les ressources en eau sont inégalement réparties dans le monde. L'eau douce, celle qui est essentielle à nos besoins, représente moins de 1 % du total des eaux présentes sur la terre ; le reste étant formé par les eaux salées des mers et des océans. L'eau

douce est donc un capital limité, renouvelable mais fragile, car menacé par une consommation croissante et par de multiples pollutions.

De plus, l'eau étant vitale pour l'être humain, les regroupements des populations dans le monde entier se sont fait autour des cours d'eau, établissant ainsi un rapport entre la distribution d'eau et la concentration des populations. Le problème qui découle de cette loi naturelle est la pollution des eaux, qui, malheureusement est accentuée par la présence des industries. La région de Yamoussoukro, baptisée « région des lacs » au centre de la Côte d'Ivoire, dont le potentiel aquatique est caractérisé par de nombreux lacs n'échappe pas à cette triptyque liant la population, l'eau et l'industrie. L'accroissement de la population appelle le développement industriel pour satisfaire les besoins vitaux. Le poids des industries et des populations sont des sources de pollution des eaux. Pour fonctionner, tout comme pour vivre, les industries et les populations devront se contenter de cette seule ressource d'eau.

La création des lacs artificiels était à des fins touristiques notamment ceux qui sont situés à l'intérieur de la ville. Aujourd'hui les données économiques de la région ont tendance à changer et la ville de Yamoussoukro, devenue la capitale politique de la Côte d'Ivoire, commence à attirer des investisseurs. Il n'est pas utopique de penser que cette région deviendra une région industrielle à tous les niveaux, vu son importance politique et son potentiel démographique. Cette industrialisation de la région n'est pas possible sans l'apport en ressource d'eau des différents lacs de la région. Plusieurs études ont été effectuées sur ces lacs en vue de contrôler l'eutrophisation de ceux-ci.

Aujourd'hui, l'eau est devenue une ressource rare et un enjeu vital dans le monde à tel point que son contrôle est à l'origine de nombreux conflits dans le monde. L'un des premiers éléments conflictuels reste et demeure l'utilisation de l'eau autant pour les besoins physiologiques vitaux des hommes que pour le fonctionnement des machines.

Pour recadrer l'ordre d'utilisation de l'eau pour satisfaire les besoins dans les deux secteurs, le laboratoire des moteurs et machines à conversion de l'énergie de l'institut national polytechnique Houphouët Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro, en collaboration avec le laboratoire de chimie physique de l'université de COCODY a décidé d'étudier l'exploitation des eaux des lacs de la région de Yamoussoukro dans une chaufferie industrielle.

L'objet de ce travail est d'utiliser les eaux polluées pour la production de la vapeur en menant des études statistiques sur les paramètres physico-chimiques des lacs en vue d'établir une base de données, de proposer un schéma de traitement physique, chimique et thermique et

ensuite, envisager un fonctionnement optimum de la chaufferie industrielle à travers un dimensionnement adéquat.

Cette étude nous permettra d'évaluer l'impact économique et technique de la pollution des eaux sur l'implantation d'une installation industrielle (surcoûts d'investissement et de fonctionnement).

Le choix s'est porté sur l'étude de 10 des lacs entièrement périurbains de la ville de Yamoussoukro.

Après une synthèse bibliographie consacrée aux différents modes de traitement des eaux industrielles, nous ferons une analyse statistique des paramètres physico-chimiques des lacs, leurs effets sur les organes mécaniques de la chaufferie.

Par la suite, on présentera des propositions de traitement des différents lacs, basées essentiellement sur l'utilisation des technologies existantes.

Enfin, nous procéderons à l'exploitation de ces eaux dans des chaufferies industrielles par un dimensionnement et une étude économique des modes de traitement.

CHAPITRE I :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- I.1 PRESENTATION DE L'ETUDE**
- I.2 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DE L'ETUDE DE L'EAU**
- I.3 ENVIRONNEMENT DE MILIEUX LENTIQUES EN COTE D'IVOIRE**
- I.4 ENVIRONNEMENT DES LACS DE YAMOISSOUKRO**
- I.5 PRESENTATION DES DIFFERENTS TYPES DE TRAITEMENT DES
EAUX**
- I.6 PRESENTATION DE LA CHAUFFERIE INDUSTRIELLE**

I.1 PRESENTATION DE L'ETUDE

Pour vivre, le monde moderne a besoin de plus en plus d'énergie dont une partie importante est utilisée sous forme d'énergie électrique, mécanique ou calorifique.

L'accroissement continu de la consommation de ces formes d'énergie est d'ailleurs une caractéristique du développement de notre société. Pour certains statisticiens, la consommation globale d'énergie d'un pays répartie par tête d'habitant sert d'ailleurs d'étalon pour estimer le degré d'évolution et de bien-être des citoyens de ce pays [3]. On peut plus ou moins être d'accord sur la valeur réelle de cette interprétation, cependant, elle permet d'avoir une idée assez exacte du développement industriel de chaque pays.

Pour satisfaire la demande en énergie électrique, mécanique ou thermique, qui ne se trouve pas dans la nature sous forme directement exploitable à l'échelle des besoins industriels, il est nécessaire de partir d'une forme d'énergie que l'on appelle énergie primaire et de la transformer en énergie secondaire exploitable [4].

Cette énergie primaire provient des combustibles fossiles (centrales thermiques) ou des combustibles fissiles (centrales nucléaires). Le passage d'énergie primaire en énergie secondaire se fait par l'intermédiaire d'un fluide qui change d'état et produit une autre forme d'énergie (secondaire) soit mécanique soit thermique ou plus loin électrique [5].

L'étude que nous abordons concerne le fluide caloporteur. Le fluide idéal utilisé jusqu'à présent dans les centrales thermiques est l'eau. Ce choix est guidé par son abondance par rapport aux autres fluides mais aussi par ses propriétés physiques.

L'eau prise en tant que molécule H_2O (un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène) c'est-à-dire à l'état pure, est le fluide idéal dont les propriétés physiques satisfont la marche normale d'une centrale thermique. Malheureusement ce fluide en tant que tel (état pur) est quasiment inexistant sur notre globe terrestre. Chimiquement, il est impossible de trouver de l'eau pure au sens propre dans la nature. Cependant les centrales thermiques doivent fonctionner avec le moins de préjudices possibles. Alors pour optimiser les propriétés physiques de l'eau dans les centrales thermiques, dans les systèmes de chauffage et pour la consommation, il faudra agir en amont sur ses propriétés chimiques.

Le développement urbain avec son cortège de pollution a eu un impact considérable sur la modification des caractéristiques chimiques de l'eau. Les exemples les plus frappants sont la lagune EBRIE de la ville d'Abidjan et les lacs de la ville de Yamoussoukro capitale politique de Côte d'Ivoire. Ces eaux de surfaces subissent les effets de la pollution urbaine.

L'utilisation de telles eaux dans une chaufferie engendre d'énormes difficultés techniques, économiques et environnementales.

Cette étude tire principalement son intérêt des difficultés que rencontrent les opérateurs économiques, sanitaires et industriels dans l'utilisation de l'eau dans les systèmes de chauffage.

L'implantation des hôtels haut standing, des centres de santé et des industries, tient compte généralement de la présence d'une ressource suffisante en eau. Ces infrastructures s'installent le plus souvent dans des zones à forte concentration de population pour des raisons de proximité et économiques. Or la population est aujourd'hui, dans les pays en voie de développement comme développés, génératrice de déchets de diverses natures qui polluent les ressources d'eau naturelles. Quelles sont les mesures à prendre pour utiliser une eau toute polluée dans la production de la chaleur pour les besoins des hôpitaux, des hôtels et des industries?

Le Laboratoire de Moteurs et Machines à Conversion de l'Energie, s'intéressant de plus près aux fluides utilisés dans les installations de chaufferie vise, à partir de cette étude, à attirer l'attention des industriels face aux dommages que leur négligence pourrait provoquer en faisant abstraction de la qualité des eaux utilisées.

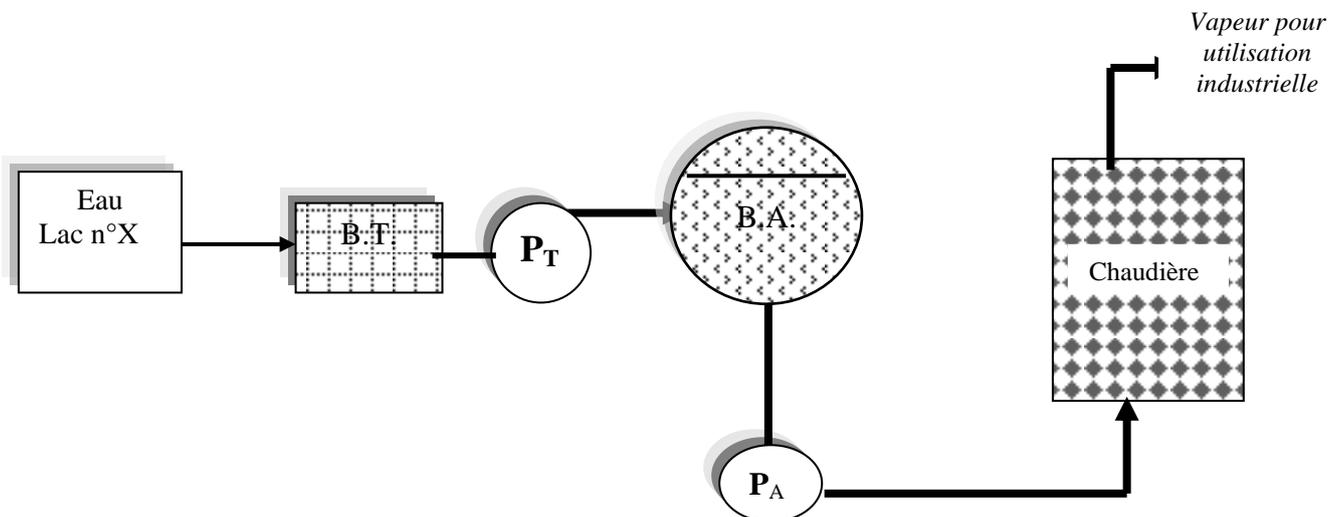


Figure 1.1 : Installation d'une chaufferie à vapeur

B.T. = Bâche pour Traitement ; B.A = Bâche d'Alimentation.

P_T = Pompe de Circulation d'eau Traitée ; P_A = Pompe d'Alimentation

L'objet de notre travail est d'admettre dans un circuit de chauffage, à partir d'une eau polluée, une eau de bonne qualité afin de ne pas endommager les conduites, les pompes, la chaudière et toutes les installations annexes en contact direct ou indirect avec l'eau, pour des

raisons de sécurité du matériel et des personnes. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons aux eaux de surface des lacs de Yamoussoukro qui, présentent les caractéristiques des eaux polluées, et nuisibles au bon fonctionnement d'une chaufferie.

I.2 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL DE L'ETUDE DE L'EAU

I.2.1 GESTION DE L'EAU DANS LE MONDE

I.2.1.1 Eaux douces

Ce sont les eaux non salées qui se trouvent dans les fleuves, dans les rivières, dans les nappes phréatiques (eaux souterraines) et dans les réservoirs (lacs, lagunes). Ces eaux servent à l'agriculture (le fleuve Niger, le Nil, les lacs Tanganyika, Victoria...), à l'élevage, à la consommation humaine (eaux potables), à la pêche, à la navigation et même au tourisme comme les lacs de Yamoussoukro, la Seine en France... Les réservoirs interviennent également dans la production de l'hydroélectricité (lacs de KOSSOU, TAABO...en Côte d'Ivoire, AKOSOMBO au Ghana...), de la vapeur (lac M'BAKRE à JACQUEVILLE pour la Société Ivoirienne de Raffinage).

Les nombreuses sollicitations faites des eaux douces font d'elles des denrées rares, bien qu'elles soient plus ou moins disponibles. Aujourd'hui de nombreux conflits dans le monde ont pour cause l'eau et surtout l'eau douce.

A l'échelle de la planète, on estime qu'environ 40000 km³ d'eau douce s'écoulent chaque année sur les terres émergées, lesquelles, partagées entre les 6 milliards d'individus, devraient fournir 6600 m³ d'eau douce à chacun ; soit plus de 18000 litres d'eau par jour. Nous sommes largement en-dessous de ce quota et pourtant les réserves d'eau douce sont globalement suffisantes pour répondre à l'ensemble des besoins.

Les réservoirs d'eau douce sont très inégalement répartis à la surface du globe. Alors que les pays occidentaux par exemple ont pour la plupart la chance de posséder d'énormes réserves qui se renouvellent chaque année pour alimenter une population qui accuse une faible croissance démographique. Beaucoup de pays tropicaux et insulaires n'ont pas d'eau en suffisance, subissent une croissance démographique galopante et connaissent des difficultés d'approvisionnement extrêmement pénalisantes. Ceux des régions arides notamment sont dans

une situation de stress hydrique sévère et il suffit d'une sécheresse pour décimer les populations les plus faibles et le bétail [6].

I.2.1 .2 Problèmes de gestion de l'eau dans le monde

L'explosion démographique qui s'accélère, passant de 6.5 milliards d'habitants en 2005 à plus de 11 milliards vers 2100, la question de l'approvisionnement en eau va devenir cruciale. Pour subvenir aux besoins alimentaires d'une population sans cesse croissante, il a fallu augmenter les surfaces agricoles et intensifier l'agriculture. La surface totale des terres irriguées a été multipliée par cinq depuis le début du XX^{ème} siècle. Elle a quasiment doublé depuis 1960, principalement en Asie (Chine, Inde, Pakistan) et aux États-Unis. La rapidité de cet accroissement s'est toutefois ralentie après 1980 dans les pays développés [7].

Aujourd'hui, à l'échelle mondiale, les hommes prélèvent environ 3800 km³ d'eau douce chaque année pour leurs différents usages. Si la population mondiale double d'ici un siècle, la demande d'eau va également exploser et avec elle la dégradation de la qualité des eaux. Si l'eau douce vient à manquer, s'il s'agit de ressources communes entre pays, cela peut entraîner des guerres ouvertes ou des embargos. On s'est battu pour des îles stratégiques ou pour l'or noir, on se battra bientôt pour " l'or bleu " si chacun ne partage pas ses ressources et ne réduit pas sa consommation.

Le 6ème Rapport du Programme commun de surveillance de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement « Water for Life: Making it Happen » (L'eau, source de vie : pour une action concrète) publié par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et le Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF) stipule que les Objectifs du Millénaire (OMD – diminution de moitié des personnes ne disposant d'aucun accès à l'eau potable et à l'assainissement) impliquent de desservir, d'ici à 2015, 2 milliards de personnes supplémentaires. L'effort à déployer est estimé à 11,3 milliards de dollars US par an. Le rapport répertorie les effets de l'absence de services adéquats, ainsi que les actions en cours et les progrès réalisés en mettant en lumière les besoins particuliers de l'Asie du Sud et de l'Afrique sub-saharienne [6].

Face à ce danger de pénurie d'eau, les organisations internationales ont pris les devants et multiplient les conférences et les rencontres pour tenter de développer une politique commune à l'échelle mondiale afin d'obtenir de tous les pays des engagements politiques fermes afin de résoudre le problème à l'échelle planétaire. Mais sur le terrain cette méthode est stérile car elle ne peut pas être suivie d'actions à l'échelle planétaire.

Si l'idée de l'entraide internationale concernant l'eau reste d'actualité, une stratégie d'action globale paraît inapplicable. Seules des actions ciblées locales (collaboration financière, coopération, etc.) portent leur fruit, et pour être efficaces, gérées par des Organisations Non Gouvernementales.

A l'horizon 2015, l'Afrique est confrontée à des défis importants dont la réduction massive de la pauvreté. "Cette option stratégique majeure, corrélée avec celle de la maîtrise de la mondialisation, doit fonder les choix futurs des Etats africains", explique l'auteur. Son ouvrage place au cœur des politiques actuelles la valorisation partagée de la ressource en eau comme facteur privilégié de développement durable et d'intégration [8].

I.2.1.3 Problématique de l'offre et de la demande en eau

De nos jours, plus d'un tiers de l'humanité soit plus de 2 milliards d'habitants survivent avec moins de 5 litres d'eau par jour, moins de 1700 m³ par an, c'est ce qu'on appelle le "stress hydrique". Dans la zone qui s'étend de la Tunisie au Soudan et jusqu'au Pakistan, c'est-à-dire dans plus de 20 pays d'Afrique du Nord et du Proche-Orient, chaque habitant doit se contenter en moyenne de moins de 3 litres d'eau par jour, soit moins de 1000 m³ d'eau douce par an, une situation dite de "pénurie chronique". Impossible dans ces conditions d'avoir une bonne hygiène et de vivre dans l'opulence. L'eau douce est donc une denrée rare pour des milliards d'habitants [6]; [7]. Dans ces pays pauvres, quatre (4) millions de personnes meurent chaque année de maladies liées au manque d'eau. 6000 enfants meurent chaque jour dans le monde pour avoir consommé une eau non potable alors que leurs maladies sont faciles à soigner. En Occident c'est tout le contraire; nous gaspillons généralement cette eau pourtant si précieuse. Les pays développés consomment chacun au moins 15 à 20 fois plus d'eau que les habitants des pays sous-développés et beaucoup plus encore dans l'industrie et l'agriculture.

I.2.1.4 Pénurie d'eau à l'horizon 2025

Depuis 1940, chaque année, la consommation d'eau dans le monde augmente de 2.5 à 3% en moyenne alors que le taux de croissance démographique n'est que de 1.5 à 2%. Dans les pays développés, les pénuries d'eau ont augmenté annuellement de 4 à 8% entre 1990 et 2000. Près d'un demi-milliard d'habitants de 31 pays, la plupart du Moyen-Orient et d'Afrique

souffrent aujourd'hui du manque d'eau. Selon l'ONU, au taux actuel de croissance de la population et de ses besoins en eau douce, en 2025 la quantité moyenne d'eau douce disponible devrait chuter de 6600 à 4800 m³ par habitant et par an, soit une réduction de près d'un tiers. A cette date, les experts estiment que 5 fois plus d'habitants qu'aujourd'hui seront touchés par la pénurie d'eau, ce qui représentera 2,8 milliards d'habitants soit 35% de la population estimée de la terre à cette époque[7].

I.2.2 GENERALITES SUR LES EAUX DANS LEUR CONTEXTE PHYSICO-CHIMIQUE

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1380 millions de km³. L'essentiel toutefois est constitué d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %) inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ un million de km³. Mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. Dans ces pays, selon le Water Resources Institute, 250 millions d'individus, ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau défini à 1000 m³ par habitant et par an. 400 millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m³ par habitant et par an. Et on estime que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir du manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau [7].

I.2.2.1 Propriétés physiques de l'eau pure

L'océan est une mince pellicule à la surface de la terre. Il aurait une importance géophysique secondaire s'il n'était constitué d'eau à l'état liquide. C'est la grande particularité de notre planète. La masse totale est constante. Sont provisoirement fixées, les molécules qui entrent dans la constitution des roches (les roches renferment en moyenne 1 à 2% d'eau).

L'eau, si on la compare à d'autres corps de composition analogue, possède des caractéristiques anormales. La particularité de l'eau provient de sa structure moléculaire. L'eau est le seul composé naturel qui existe sous les 3 états dans les conditions rencontrées à la surface de la terre. L'état liquide étant le plus fréquent. Le changement d'état se fait en

rompant des liaisons hydrogène. Pour cela il faut fournir une énergie importante, ce qui explique les valeurs élevées de chaleurs latentes de fusion et de vaporisation de l'eau.

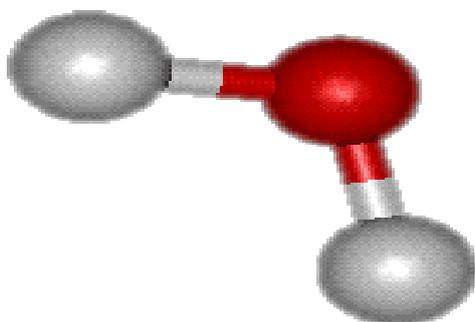


Figure 1.2 : Structure de la molécule d'eau

L'eau est le milieu naturel où le plus grand nombre de substances (minérales, organiques, à l'état gazeux, liquides ou solides) peuvent se dissoudre et entrer en réaction. La conductivité électrique de l'eau pure est relativement faible, mais celle de l'eau de mer est à mi-chemin entre celle de l'eau pure et du cuivre.

Tableau 1.1 Caractéristiques principaux de l'eau

<i>Paramètres physiques</i>	<i>Caractéristiques</i>
Masse volumique	1000kg/m³
Enthalpie de vaporisation à 25°C	2445J/g
Enthalpie standard de formation de l'eau à l'état gazeux à 25°C	-241,8kJ/mol
Chaleur latente de vaporisation de l'eau	2250 J/g à 100°C
Chaleur de fusion de la glace	6 kJ/mol
Chaleur spécifique	4,184 J/g.K.

I.2.2.2 L'eau de mer

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de 35 g.L⁻¹ (27,2 g.L⁻¹ de NaCl ; 3,8 g.L⁻¹ de MgCl₂ ; 1,7 g.L⁻¹ MgSO₄ ; 1,26 g.L⁻¹ CaSO₄ ; 0,86 g.L⁻¹ K₂SO₄). Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées telles que : La mer Méditerranée : 36 à 39 g.L⁻¹ ; la mer Rouge : environ 40 g.L⁻¹ ; la mer Caspienne : 13 g.L⁻¹ ; la mer Morte : 270 g.L⁻¹ et le Golf

Arabo-persique : 36 à 39 g.L⁻¹. Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 ; ce qui fait dire que l'eau de mer est un milieu légèrement basique [9] ;[10].

Tableau 1.2 : Principaux sels dissous dans une eau de mer de salinité 35g/kg

Anions (en g/kg)		Cations (en g/kg)	
Chlore (Cl^-)	18,9799	Sodium (Na^+)	10,5561
Sulfate (SO_4^{2-})	2,6486	Magnésium (Mg^{2+})	1,2720
Bicarbonate (HCO_3^-)	0,1397	Calcium (Ca^{2+})	0,4001
Brome (Br^-)	0,0646	Potassium (K^+)	0,3800
Fluor (F^-)	0,0013	Strontium (Sr^{2+})	0,0135

I.2.2.3 Eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le $CaCO_3$, le $CaSO_4$, le $MgCO_3$ et le $NaCl$.

I.2.3 CONSEQUENCES DE L'EAU SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA CHAUFFERIE INDUSTRIELLE

I.2.3.1 Corrosion et entartrage

1.1.1.1 La plupart des eaux naturelles ne sont pas utilisables directement pour l'alimentation des chaudières. Elles doivent subir une épuration physique, chimique et/ou biologique, en général, avant l'entrée dans la chaudière, dans l'appareil ou dans le système prévu à cet effet. Cette épuration peut se faire dans le générateur mais seulement dans certaines installations à faible importance ou puissance. Le traitement doit être d'autant plus poussé que la pression de service est plus élevée. Car la température élevée accentue l'action destructrice de certains composés chimiques que contiennent

les eaux naturelles. D'autres part, la présence des dépôts dus à la décomposition de substances minérales est plus néfaste à haute qu'à basse pression. [11] ; [12].

Le tableau 1.2 présente les différentes formes de tartres provoquées par l'eau brute dans les installations de chaufferie industrielle.

Tableau 1.3 : Tartre et corrosion dans l'eau[13]

NOM	SYMBOLE	NOM COMMUN	CONSEQUENCE
Carbonate de calcium	CaCO ₃ Roche	Calcaire	Tartre mou
Bicarbonate de calcium	Ca(HCO ₃) ₂	Tartre	Mou
Sulfate de calcium	CaSO ₄	Gypse, Plâtre de Paris	Tartre dur
Chlorure de calcium	CaCl ₂		Corrosion
Carbonate de magnésium	MgCO ₃	Magnésie	Tartre mou
Sulfate de magnésium	MgSO ₄	Sels d'Epsom	Corrosion
Bicarbonate de magnésium	Mg(HCO ₃) ₂		Tartre, corrosion
Chlorure de magnésium	MgCl ₂		Corrosion
Chlorure de sodium	NaCl	Sel commun	Electrolyse
Carbonate de sodium	Na ₂ CO ₃	Cristaux de soude	Alcalinité
Bicarbonate de sodium	NaHCO ₃	Soude calcinée	Primage et mousse
Soude	NaOH	Soude caustique	Alcalinité et fragilisation
Sulfate de sodium	Na ₂ SO ₃	sels de Glauber	Alcalinité
Dioxyde de silice	SiO ₂	Silice	Tartre dur

Source : (CETIM, 1988)

I.2.3.2 Corrosion dans les chaudières

La corrosion est le retour d'un métal à sa forme de minerai. Le fer, par exemple, retourne sous forme d'oxyde de [fer](#) sous l'effet de la corrosion.

Dans le cas des températures élevées et des fortes contraintes dans la chaudière, le métal tend à accélérer les mécanismes de corrosion. Dans la vapeur et les systèmes de condensation, la corrosion est généralement le résultat de contamination au dioxyde de carbone ou à l'oxygène.

La corrosion dans les chaudières s'effectue généralement quand l'alcalinité de l'eau des chaudières est faible ou lorsque le métal est exposé à l'oxygène durant les temps de service ou les temps morts.

Les contaminants spécifiques tels que l'ammoniaque ou le sulfure portés par les gaz peuvent augmenter l'attaque sur le cuivre dans le système [14]. Généralement, des températures plus élevées, des niveaux hauts ou bas de pH et de fortes concentrations en oxygène augmentent le taux de corrosion de l'acier. Les facteurs mécaniques et opérationnels comme les vitesses, les efforts sur les métaux et la sévérité de service peuvent fortement influencer les taux de corrosion.

Les différents types de corrosion rencontrés dans le milieu industriel sont les suivantes :

- [Corrosion électrochimique \(corrosion galvanique, corrosion acide, corrosion par piqure\)](#)
- Corrosion sèche ([fragilisation par hydrogène](#))
- Corrosion chimique ([attaque par l'oxygène](#), [attaque par le dioxyde de carbone](#)) .

Il existe d'autres paramètres qui influencent négativement la corrosion tels que :

- **La conductivité du milieu :** Si la concentration en sels dissous augmente, la conductivité de l'eau augmente également. La résistance du milieu reliant, dans l'eau, l'anode à la cathode diminue et la vitesse de corrosion augmente [15];
- **L'influence des microorganismes :** Parmi les microorganismes que l'on trouve dans les sols, il existe différentes sortes de bactéries aérobies (*Ganiella*, *crenothrix*, *leptothrix*) dites ferrobactéries qui émettent des enzymes catalysant l'oxydation du fer divalent par l'oxygène dissout. Certaines de ces bactéries peuvent se retrouver dans l'eau et l'oxydation d'origine bactérienne va s'ajouter à l'oxydation chimique. Elle a lieu à la surface des tubercules de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ [13] ;[16].

A l'intérieur de ces tubercules peuvent apparaître des bactéries anaérobies telles que les sulfo-réductrices (réduisent les sulfates en sulfures). Dans ce cas la corrosion s'accélère à cause des ions sulfures S^{2-} et ferrique Fe^{2+} qui précipitent [12].

La protection de l'acier dans un système de chaufferie dépend de la température, du pH, et de la teneur en oxygène.

Les techniques pour lutter contre la corrosion varient selon le type de corrosion rencontré. Les principales méthodes sont le maintien d'un pH adéquat, le contrôle de l'oxygène et des dépôts, et la réduction des contraintes grâce au design et aux conditions de service.

I.2.3.3 Entartrage

L'entartrage ou la précipitation des sels sous forme solide, formant des dépôts, intervient principalement lors de l'élévation de la température et lorsque la concentration en sels minéraux est élevée. Les tartres les plus fréquemment rencontrés sont les tartres calciques (carbonate, sulfate et phosphate de calcium, le $Mg(OH)_2$ et la silice. (Tableau 1.2).

a) Encrassement biologique

L'encrassement biologique se rencontre surtout dans les circuits de refroidissement et d'eaux potables mais pas dans les canalisations d'eaux de chaudières [17].

Dans les circuits de refroidissement les microorganismes susceptibles de se développer sont les algues, les bactéries et les champignons.

Ces microorganismes sont généralement présents à l'état latent et ne gênent pas le fonctionnement du circuit. Mais si des conditions favorables se présentent, ils se développent et forment des dépôts provoquant ainsi l'encrassement. Ces dépôts favorisent la corrosion par aération différentielle. Un film d'une épaisseur de $55\mu m$, réduit de 20% le rendement d'une centrale [18].

b) Influence des dépôts

La transmission de la chaleur par conduction à travers une paroi est directement liée au coefficient de conductibilité globale K. Les dépôts de toutes sortes sur les parois de la conduite provoquent [19]:

- une transmission de chaleur défectueuse et une baisse de rendement résultant de la présence de dépôts sur les surfaces de chauffe ;
- un risque de rupture des surfaces de chauffe ;
- une obstruction de la tuyauterie d'alimentation, des organes de réglages et de sécurité susceptibles d'être à l'origine d'avaries par manque d'eau...

Parmi les substances minérales contenues dans l'eau de chaudières, la silice est à mentionner spécialement pour les eaux de chaudières à haute pression. En effet, la silice

forme des dépôts extrêmement durs sur les tubes des surchauffes et sur les turbines. La silice peut être entraînée par la vapeur à partir de 250°C correspondant à une pression de 39bars dans les conditions normales de service, et causer des dommages dans les appareils d'utilisation.

c) Le primage

Le primage est un entraînement d'eau avec la vapeur dans les circuits. Le primage est causé par la concentration en carbonate de sodium, sulfate de sodium ou chlorure de sodium en solution. Il concerne essentiellement les chaudières. Les causes sont la marche poussée des générateurs de vapeurs ; la mauvaise conception du matériel ; la demande brusque de vapeur ; la salinité exagérée de l'eau de chaudière ; la présence de boues et de matière organique. Il se présente sous plusieurs aspects : le primage par « coup d'eau » ; le primage par entraînement de gouttelettes et le primage par mousses [20].

Le primage a pour conséquences :

La baisse du rendement thermique de l'installation en raison des mauvaises caractéristiques de vapeur. Au niveau des surchauffeurs, il y a évaporation des gouttelettes et les sels sont entraînés à l'état de fines particules qui vont se déposer sur les parois des surchauffeurs. Comme les sels ont une mauvaise conductibilité thermique, il y aura des surchauffes locales provoquant ainsi un affaiblissement de la résistance mécanique du fer (problèmes : déformation, rupture du matériau ...).

Les sels se déposent également sur les ailettes de la turbine provoquant un déséquilibre et une baisse de rendement, l'usure des aubages des turbines, les dépôts et corrosion des parties fixes et mobiles. Les risques d'obstruction des dispositifs de prise de vapeurs, d'alimentation insuffisante du surchauffeur. Ce qui entraîne une élévation anormale de la température et la provocation des coups de bélier [12] ;[15].

I.2.3.4 La dureté de l'eau

La dureté est souvent le résultat de la présence de sels minéraux de calcium et de magnésium. Ce sont les composants chimiques les plus importants qui influencent la formation du tartre.

Nous avons deux classifications de dureté : La dureté alcaline/temporaire et La dureté non-alcaline/permanente.

a) Dureté alcaline/ temporaire

Les bicarbonates de calcium et de magnésium sont responsables de la dureté temporaire. Ils se dissolvent dans l'eau pour former une solution alcaline et lorsque de la chaleur est fournie à l'eau, ils se décomposent en formant du dioxyde de carbone, du tartre mou ou de la boue. Le nom de dureté temporaire est utilisé parce qu'ils peuvent être éliminés par ébullition [21].

b) Dureté permanente non alcaline

La dureté permanente non alcaline est encore due aux sels de magnésium et de calcium mais cette fois, il s'agit des sulfates et des chlorures. Ils sont précipités à cause de leur solubilité réduite lorsque la température augmente et rend difficile l'évacuation du tartre dur. La présence de silice dans l'eau de chaudière peut aboutir à du tartre dur et il peut réagir avec les sels de calcium et de magnésium pour former des silicates qui retarderont grandement le transfert de chaleur.

$$\text{Dureté temporaire} + \text{dureté permanente} = \text{dureté totale}$$

L'Addition de la dureté totale et les sels non durs donne les *sels totalement dissous (TDS)*

Tableau I.4 : Résumé des risques et Inconvénients de l'eau brute sur la chaufferie

Causes du désordre	Incidents d'exploitation
Présence d'une certaine dureté dans l'eau brute	<ul style="list-style-type: none">- transmission de chaleur défectueuse et baisse de rendement résultant de la présence de dépôts sur les surfaces de chauffe- risque de rupture des surfaces de chauffe- obstruction de la tuyauterie d'alimentation, des organes de réglages et de sécurité susceptibles d'être à l'origine d'avaries par manque d'eau.
Salinité totale excessive conduisant à une forte concentration en chaudière	La concentration se corrige par extractions à condition que l'eau introduite ne soit pas trop chargée en substances diverses et surtout en sels alcalins. Si ces extractions ou purges doivent atteindre un volume incompatible avec la bonne marche du générateur, celles-ci resteront insuffisantes et la concentration deviendra excessive. des phénomènes de primage sont à craindre.
Alcalinité excessive en chaudière	Si parmi les substances diverses, les sels alcalins prédominent, en plus du primage, une attaque de la robinetterie en bronze peut se produire.
Teneur assez sensible en gaz dissous dans l'eau brute	Des corrosions par oxygène dissous sont à craindre dans les tuyauteries d'alimentation, dans les chaudières et économiseurs en acier ainsi que des corrosions dans les conduites de retour d'eau de condensation par le gaz carbonique entraîné avec la vapeur.

I.3 ENVIRONNEMENT DES MILIEUX LENTIQUES EN COTE D'IVOIRE

Les études relatives aux problèmes sociaux en ces dernières années ont montré qu'il y a deux choses qui sont à l'origine des conflits en Côte d'Ivoire. Il s'agit de la terre et de l'eau. Elles donnent respectivement lieu à des litiges fonciers et halieutiques. Sur les 19 régions, il y a 6 qui sont concernées par les litiges halieutiques soit 31%. Sur ces 6, il y a 3 qui sont exclusivement touchées par les litiges halieutiques, soit 50%. Les 3 autres sont à la fois touchées par les deux litiges, soit 50% [22].

Concernant les milieux lentiques (réservoirs et lacs), plus de 500 retenues d'eau existent sur toute l'étendue du territoire ivoirien. Ces milieux sont divisés en 5 catégories:

- Six barrages hydroélectriques mobilisant 37,6 milliards de mètres cubes d'eau et gérés par l'Energie Electrique de Côte d'Ivoire (EECI) et la Compagnie Ivoirienne d'Electricité (CIE);
- Plus de 50 barrages hydro-agricoles créés par l'ex-Société de Développement de RIZ, la Compagnie Ivoirienne de Développement des Textiles (CIDT) et la Société de Développement de SUCRE (SODESUCRE) et plus de 400 barrages agro-pastoraux créés par l'ex-Société de Développement et de la Production Animale (SODEPRA). Les barrages hydro-agricoles et agro-pastoraux permettent de stimuler d'une part le développement agricole grâce aux possibilités d'irrigation des périmètres agricoles et d'autre part ils favorisent l'élevage dans les régions du Nord et du Centre de la Côte d'Ivoire. La demande en eau pour l'irrigation s'élève à 700 millions de mètre cube par an soit 0,9% des ressources en eau disponibles. Cette estimation prend en compte les plantations encadrées par les sociétés agricoles étatiques, para-étatiques ou privées. Les besoins en eau du cheptel sont évalués à environ 250 millions de mètre cube par an soit 0,3% des eaux disponibles. Les départements de FERKESSEDOUGOU, KORHOGO et BOUNDIALI, possèdent 238 barrages ; - plus de 30 barrages à usage domestique créés par la SODECI. La consommation domestique en eau représente environ 0,14% des eaux disponibles sur le territoire soit 110 millions de mètre cube par an. Plus d'une dizaine de retenues ont été créés essentiellement pour l'embellissement de la ville de YAMOOUSSOUKRO. Six de ces lacs sont colonisés à divers degrés par les macrophytes.

I.3.1 LAGUNE EBRIE D'ABIDJAN

Abidjan, la capitale économique, est située au sud de la Côte d'Ivoire et abrite plus de 5 millions d'habitants. Clouée sous le poids de sa population, le système d'assainissement de la ville est défaillant. La lagune EBRIE est donc devenue le réceptacle des eaux usées, des déchets ménagers comme industriels sans le moindre traitement.

La mesure de la DCO (demande chimique en oxygène) et de la DBO (demande biochimique en oxygène), paramètres qui caractérisent la pollution, a montré que les taux dans la lagune sont au-delà des normes acceptables. Les résultats de l'analyse effectuée montrent des taux allant jusqu'à 1632 mg/L pour la DCO et 740 mg/L pour la DBO [23]. Globalement le rapport DCO/DBO est supérieur à 2. Ce paramètre témoigne du degré de pollution de la lagune. Cette eau est également saumâtre du fait de sa communication avec l'Océan Atlantique par le canal de VRIDI (zone portuaire d'Abidjan). Les nombreuses industries dans la ville d'Abidjan, qui contribuent à la pollution de cette lagune, n'osent pas utiliser l'eau de la lagune dans leurs unités de production de vapeur. La plupart utilise l'eau de ville. La seule centrale thermique qui utilise un autre type d'eau est la centrale thermique de la SIR (Société Ivoirienne de Raffinage). Mais cette eau provient d'un lac (M'BAKRE) situé à 50 km à l'ouest d'Abidjan. La centrale thermique de VRIDI de l'ECCI (Energie Electrique de Côte d'Ivoire), qui produit 90 kV à la pression de 100 bars avec une température de 510°C, utilise l'eau de ville (SODECI). Cette centrale fonctionne avec deux bâches alimentaires d'une capacité cumulée de 500 m³.

Alors que la ville d'Abidjan connaît des problèmes d'approvisionnement en eau potable, notamment dans les quartiers d'ABOBO et de YOPOUGON, une importante quantité de cette eau alimente les industries. Le problème fondamental de cette question est que l'eau de la lagune serait polluée et ne peut être admise dans la chaufferie. Mieux le coût de traitement d'une telle eau est insupportable. La capitale politique de la Côte d'Ivoire, Yamoussoukro connaît les mêmes problèmes. La position périurbaine des lacs de cette ville fait de ceux-ci, à l'image de la lagune EBRIE d'Abidjan, un réceptacle des eaux usées et des déchets ménagers, tant le système d'assainissement est défaillant.

I.4 ENVIRONNEMENT DES LACS DE YAMOOUSSOUKRO

I.4.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET DONNEES HYDROCLIMATIQUES

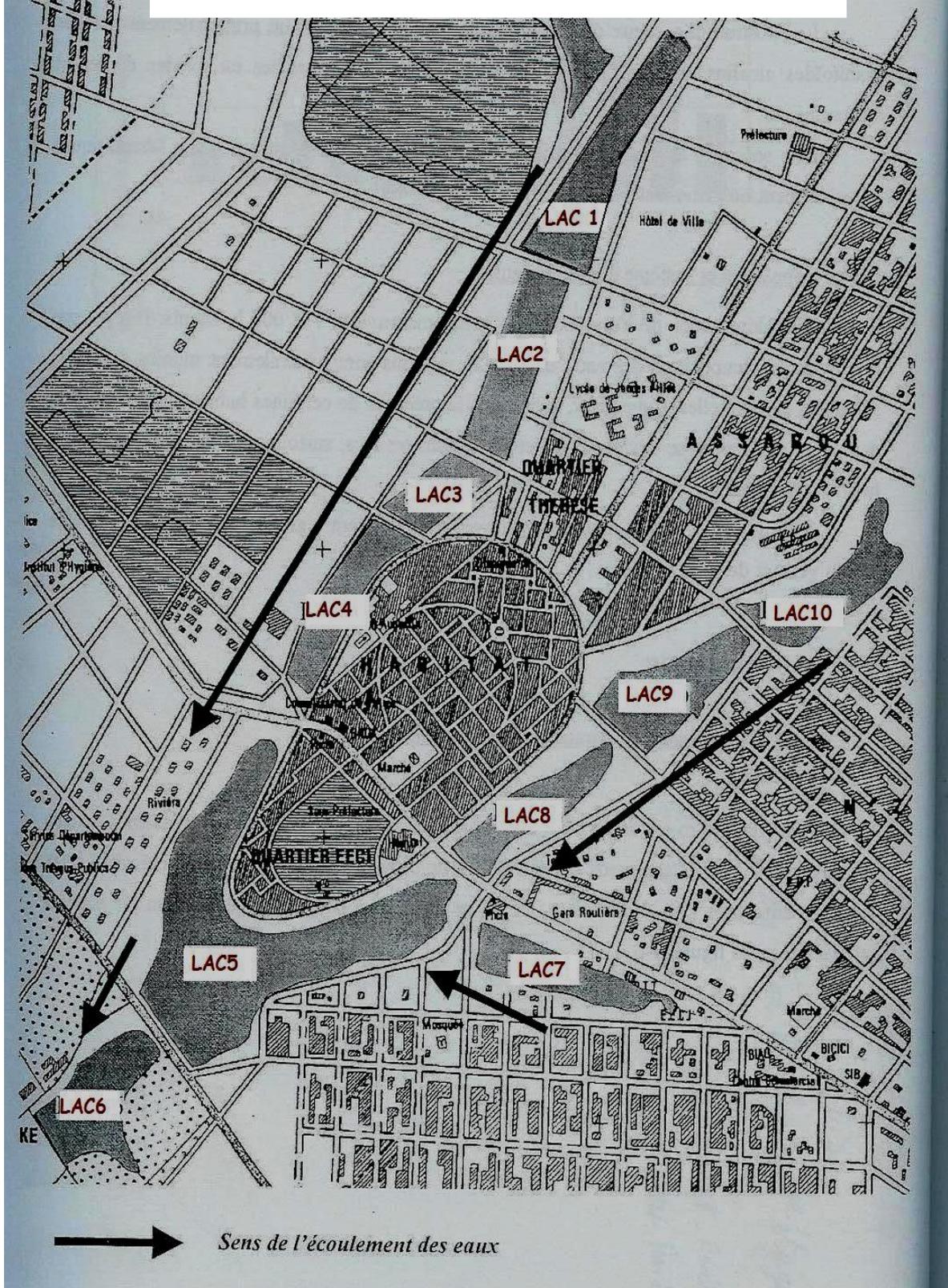
La ville de Yamoussoukro, capitale politique de la Côte d'Ivoire, est située dans le centre du pays à 270km au Nord-Est d'Abidjan. Elle est à 6°7' de latitude Nord et à 5°2' de longitude Ouest. Yamoussoukro est dotée d'un ensemble de lacs artificiels, qui ont été aménagés dans les années 1970. Notre étude s'est portée sur dix d'entre eux numérotés de 1 à 10. Ils sont alimentés par deux cours d'eau et communiquent entre eux (Planche I)

Le climat de la région de Yamoussoukro est de type tropical humide de transition. Il est caractérisé par une longue saison sèche (de novembre à février) et une saison des pluies ayant deux maxima, l'un en mai ou juin et l'autre en septembre ou octobre.

La température moyenne est de 25.6°C, avec des variations mensuelles généralement inférieures à 3°C et des variations journalières pouvant atteindre 10°C. La pluviométrie moyenne est de 1150mm. (Station Rhône Poulec).

.../...

Planche I : Plan des lacs de la ville de Yamoussoukro [24]



Source : (LHOTE, 2000)

I.4.2 ACTIVITES ANTHROPIQUES ET POLLUTION BIOCHIMIQUE

I.4.2.1 Activités anthropiques

Les activités extérieures exercées dans les environs des lacs sont multiples. Il s'agit notamment maraîchages et de riziculture dans certains bas-fonds, du commerce avec le développement des maquis, bars et restaurants qui rejettent leurs déchets dans les lacs [25]. Tous ces rejets sont la cause de la pollution de ces lacs.

I.4.2.2 Pollution biochimique

Les valeurs de DBO₅, dans le tableau 1.4, mesurées dans les lacs sont comprises entre 15,35mg/L (lac 10) et 45,2mg/L (lac5). Ces valeurs sont supérieures à la limite des eaux de consommation qui est de 4 mg/L et inférieure à la limite des rejets urbains qui est de 150mg/L. Il apparaît donc que les eaux des lacs de Yamoussoukro ne peuvent pas être destinées à la consommation. Avec la moyenne de 25,66mg/L, elles sont dans les limites favorables à la prolifération des micro-organismes aquatiques [25].

Tableau1.5 : Degré de pollution biochimique des lacs

Lacs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moy.
DBO ₅ (mg/L)	16,80	17,68	21,30	29,23	45,20	23,80	37,25	25,65	24,40	15,35	25,66

Source :(MAHAN, 2002)

I.4.3 POLLUTION MICROBIOLOGIQUES DES LACS

Les eaux des dix lacs de Yamoussoukro, utilisées par les maraîchers pour l'arrosage des parcelles sont si polluées que les plantes qu'elles servent à alimenter sont désormais impropres à la consommation.

Les analyses, faites par la FAO (Fond Alimentaire Mondial) en 2005 dans le cadre d'un important projet d'appui au développement de l'horticulture urbaine et périurbaine, ont démontré une très forte contamination des eaux utilisées par trois principaux germes à savoir les *escherichia coli*, les streptocoques fécaux et les salmonelles. Ces analyses affirment que si

les *Escherichia coli* et les streptocoques fécaux sont tolérés à un certain degré de contamination, la norme concernant la présence de salmonelles est très stricte. Les niveaux de contamination livrés par les analyses sont nettement supérieurs à la norme de tolérance [26].

Les analyses effectuées ont aussi porté sur les légumes produites ; elles ont pour leur part indiqué une contamination des légumes par les mêmes germes précités. Ce qui explique que, depuis trois ans, Yamoussoukro soit devenue une zone endémique de fièvre typhoïde. Comme les dix lacs communiquent entre eux, aucun n'est épargné. Les autorités locales ont aussi lancé un appel aux femmes afin qu'elles s'abstiennent d'acheter également les poissons pêchés clandestinement dans ces eaux et mis sur le marché [27].

Cette étude est confirmée par les travaux sur la concentration de quelques micro-organismes dans les lacs [25], et qui sont consignés dans les tableaux 1.4 et 1.5 ci-dessus.

Tableau 1.6 : Degré de pollution microbiologique des lacs en UFC/ml

	<i>Escherichia coli</i>	<i>Entérocoques</i>	<i>Clostridium perfringens</i>	<i>Straphylococcus aureus</i>	<i>Pseudomonas aéruginosa</i>
Lac1	40	60	50	90	20
Lac2	60	100	120	100	90
Lac3	100	200	80	170	120
Lac4	220	120	200	80	210
Lac5	600	470	250	300	350
Lac6	300	380	230	400	320
Lac7	400	650	360	460	420
Lac8	270	280	370	340	280
Lac9	260	230	310	140	120
Lac10	200	100	50	120	100

Source : (MAHAN, 2002)

I.4.4 EUTROPHISATION DES LACS

L'eutrophisation est en général utilisée pour décrire l'enrichissement excessif d'un plan d'eau par l'apport artificiel et indésirable de substances nutritives favorisant le

développement végétal [28]. Le milieu aquatique est un milieu vivant, gouverné par des équilibres complexes entre une grande variété d'organismes végétaux et animaux. Certains chercheurs les repartissent en trois classes : les producteurs primaires, les consommateurs et les décomposeurs [29].

En l'absence de perturbation, le système est généralement équilibré, et il apparaît une auto régulation entre producteurs, consommateurs et décomposeurs. Mais si le milieu reçoit des apports nutritifs trop importants (phosphates, nitrates,...) son équilibre écologique peut se rompre. On assiste alors à une prolifération de la matière végétale qui s'accumule sur le site, et qui est susceptible de modifier profondément les caractéristiques du milieu et déplacer ses équilibres physicochimiques.

I.4.4.1 Inconvénients

Les inconvénients qui découlent de l'eutrophisation sont résumés comme suit [30]:

- L'aspect inesthétique de l'eau (couleur, odeur, couverture végétale de l'eau ...)
- Les risques sanitaires (toxicité de certaines algues et animaux, développement des vecteurs de paludisme, de bilharziose, de la fièvre jaune et d'autres maladies hydriques)
- Les difficultés pour la potabilisation de l'eau
- L'altération de la biodiversité et des pêches (prédominance de certaines espèces au détriment d'autres).

I.4.4.2 Difficultés de potabilisation de l'eau

L'envahissement par le phytoplancton peut entraîner des variations brutales et rapides de la consistance physique de l'eau ; posant ainsi d'énormes difficultés aux petites unités de traitement d'eau (élimination des algues par coagulation/floculation malaisée entraînant ainsi une surconsommation de réactifs, colmatage des filtres). Les algues excrètent des quantités non négligeables de matières organiques qui peuvent consommer rapidement le chlore injecté. Ce qui conduit à la formation d'organochlorés (dangereuses pour la santé humaine) dans l'eau potable [31].

La présence de phytoplancton est souvent à l'origine de goûts et d'odeurs désagréables dans les eaux [32]. Il a été démontré que la présence d'un excès de phytoplancton, de macrophytes flottants contribuent à la désoxygénation des eaux eutrophes [33].

I.4.4.3 Contrôle de l'eutrophisation

En dehors des facteurs qui jouent directement sur la production primaire, le phénomène d'eutrophisation est influencé par d'autres paramètres qui sont entre autres : le climat, la géologie et la topographie du bassin versant, la nature des activités dans le bassin versant, la morphologie du plan d'eau et la composition de la faune aquatique.

L'eutrophisation étant perçue comme l'enrichissement excessif d'un plan d'eau par l'apport artificiel et indésirable de substances nutritives favorisant le développement végétal [28] ; tous les travaux visant à la contrôler ont consisté à procéder à l'élimination des nutriments indexés (traitement curatif). Pour prévenir l'eutrophisation, ces dernières années, tous les efforts de lutte contre l'eutrophisation se sont donc portés sur la réduction des apports en phosphore et d'azote aux plan d'eau. [24] ;[34].

I.4.5 ENVAHISSEMENT DES LACS PAR LES VEGETAUX AQUATIQUES

En Côte d'Ivoire, il a été recensé environ 150 espèces de plantes aquatiques disséminées sur le réseau hydrographique. Les milieux aquatiques sont envahis par des macrophytes appartenant à des espèces et des formes de développement variées. On y distingue des hydrophytes flottantes libres (*Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes*), des hydrophytes à feuilles flottants (*Nymphaea lotus*) et *Polygonum senegalense* ainsi que d'autres plantes de milieux aquatiques dont *Nelumbo nucifera* et *Echinochloa pyramidalis*. Trois espèces de macrophytes flottants se sont développées de manière alarmante depuis les débuts des années 1980. [35], Ce sont :

- *Eichhornia crassipes* (*pontederiaceae*) du nom courant : jacinthe d'eau ;
- *Salvinia molesta* (*salviniaceae*) du nom courant : fougère d'eau.

Une étude floristique réalisée au mois de juillet 1998, a permis de dresser un inventaire des espèces présentes sur les lacs de Yamoussoukro. Ce sont : Les *eichhornia crassipes* (jacinthe d'eau) ; les *pistia stratiotes* (salade d'eau) ; les *nelumbo nucifera* (lotus) et les *Nymphaea lotus* (nénuphar) [36].

Les lacs de la ville de Yamoussoukro sont presque entièrement envahis par les macrophytes aquatiques. Six des dix lacs de la ville connaissent des situations diverses. Le lac 5 situé près de l'hôpital est couvert par *Eichhornia crassipes*, *Echinochloa pyramidalis*, *Nelumbo nucifera* et *Nymphaea lotus* (Planche III). Le lac 6 situé près de la basilique Notre

Dame de la Paix est envahi principalement par *Eichhornia crassipes* (Planche III). Le lac 7 situé dans le prolongement de l'hôtel Bonheur2 est couvert par *Eichhornia crassipes*, *Nymphaea lotus*, *Nelumbo nucifera* et *Echinochloa pyramidalis* (Planche III). Le lac 8, premier lac près de la gare routière, est couvert par *Nymphaea lotus*, *Echinochloa pyramidalis* et *Eichhornia crassipes* (Planche IV). Le lac 9, situé dans le prolongement du lac 8 est envahi par *Nymphaea lotus* et *Nelumbo nucifera*). Le lac 10, situé dans le prolongement du lac 9, est surtout couvert par *Pistia stratiotes*. A Kossou, l'on note la présence de *Polygonum senegalense* sur les berges du lac. Ici, la couverture est insignifiante (surface couverte équivalente à 10%) [37];[38];[39];[40]. Il s'en suit donc les principaux groupes taxonomiques présents dans les lacs 1, 5 et 7.

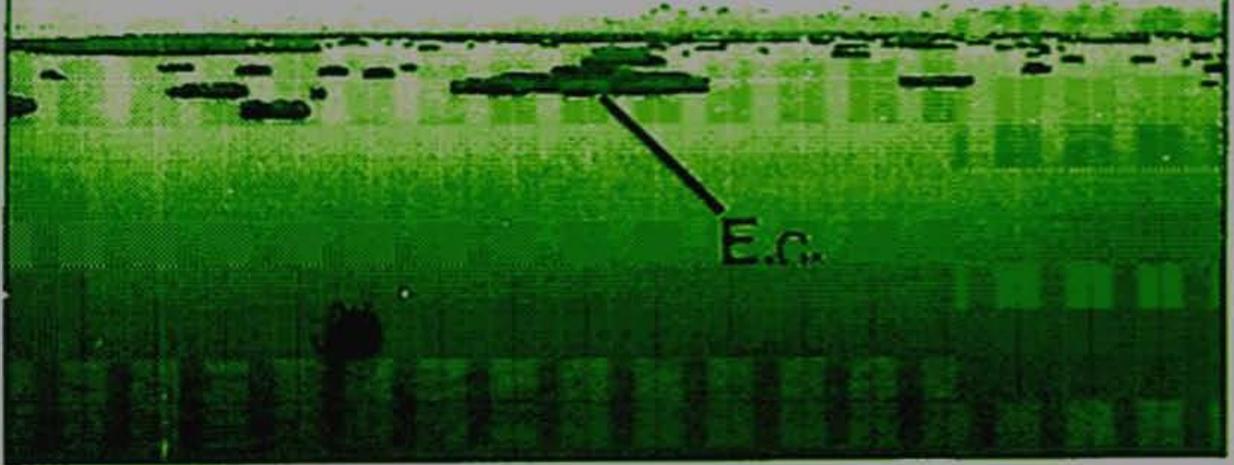
Les plantes aquatiques constituent des microcosmes où vivent et se nourrissent de nombreux vecteurs de maladies hydriques. Ce sont d'une part les maladies dont la progression est liée à la présence de l'eau car nécessitant un ou deux hôtes intermédiaires inféodés au milieu aquatique (bilharziose, filarioses) et d'autre part les maladies transmises par des insectes vecteurs liés à l'eau c'est-à-dire des insectes développant un de leur stade dans l'eau (paludisme, onchocercose). La présence de nombreux moustiques dans la ville de Yamoussoukro pourrait être liée à l'envahissement des lacs par les macrophytes aquatiques [37].

Tableau 1.7: Densités relatives (par lac) des principaux groupes taxonomiques présents dans les lacs 1,5 et 7 [36]

	Phytoplankton (Cellules/L)	Nombre d'espèces	% de chlorophycées	% de cyanophycées	% de diatomées	% de dinophycées	% d'euglénophycées
Lac1	7800	281	62%	12%	5%	11%	3%
Lac5	28000	215	32%	36%	25%	0%	2%
Lac7	16000	260	40%	14%	7%	0%	37%

Source : (KOUASSI, 1998)

BARRAGE DE TAABO:
ECHHORNIA CRASSIPES



BARRAGE DE KOSSOU:
P. SENEGALENSE

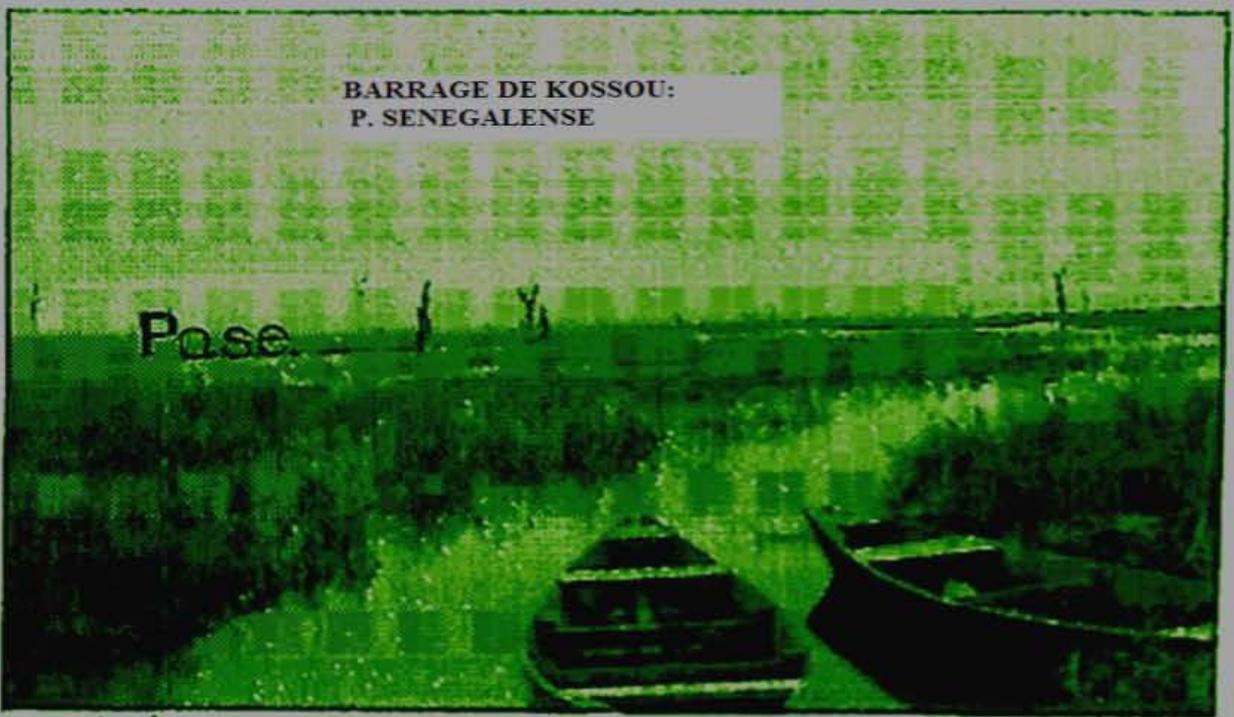


PLANCHE II : Vue photographique des lacs de TAABO et de KOSSOU

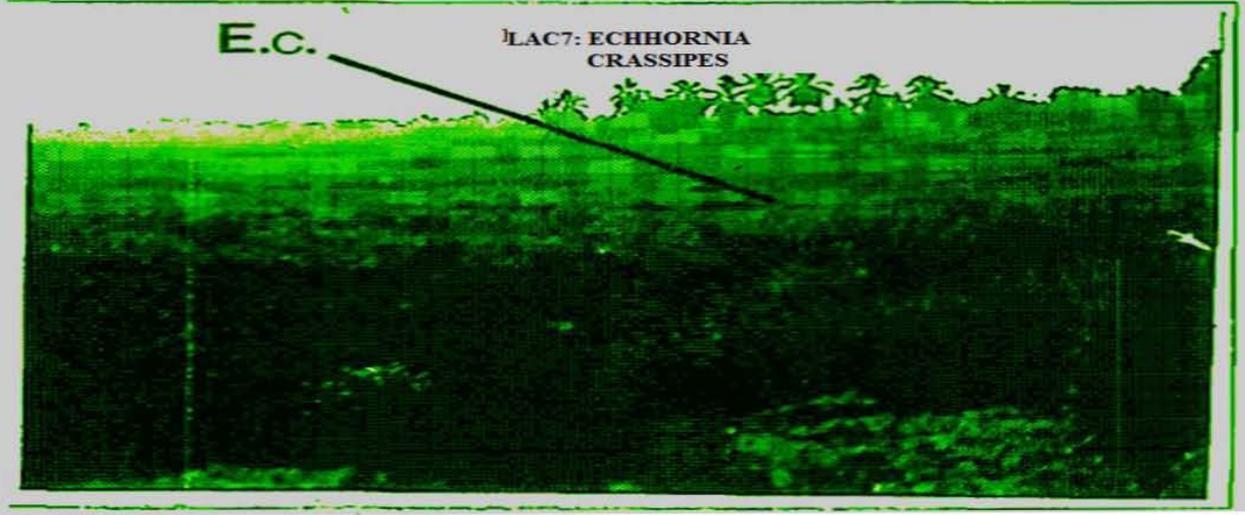
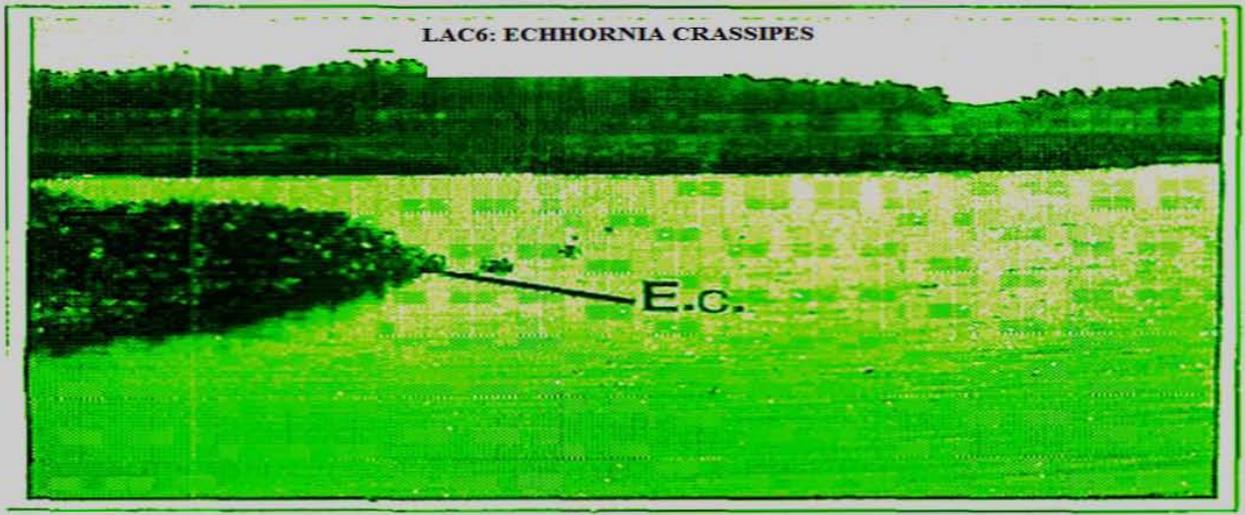
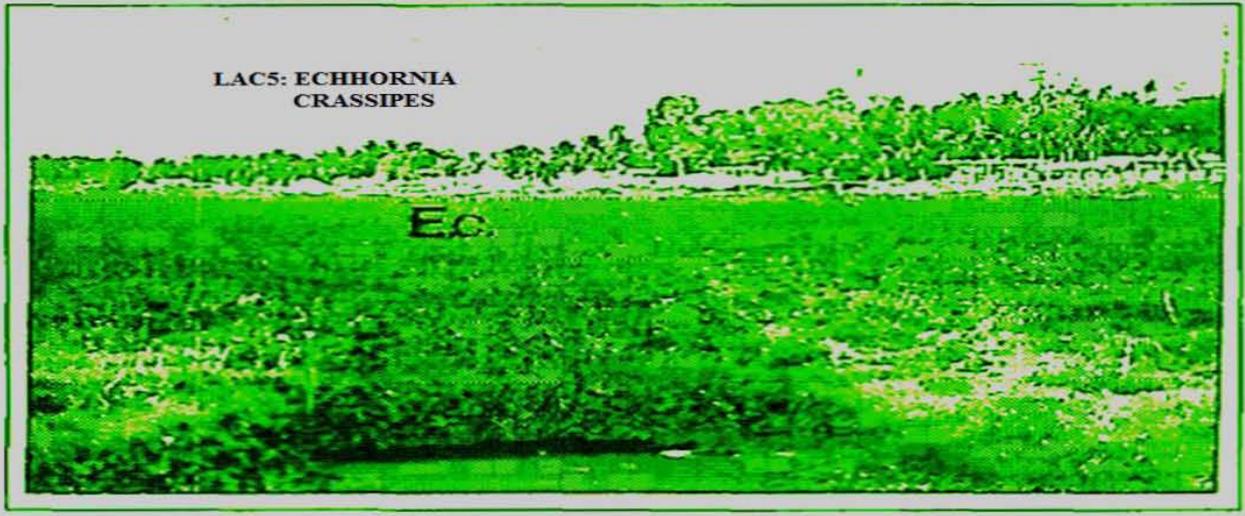


PLANCHE III : Vue photographique des lacs 5,6 et 7 de YAMOOUSSOUKRO



Lac 8 (Yamoussoukro)

P.s.: *P. stratiotes*

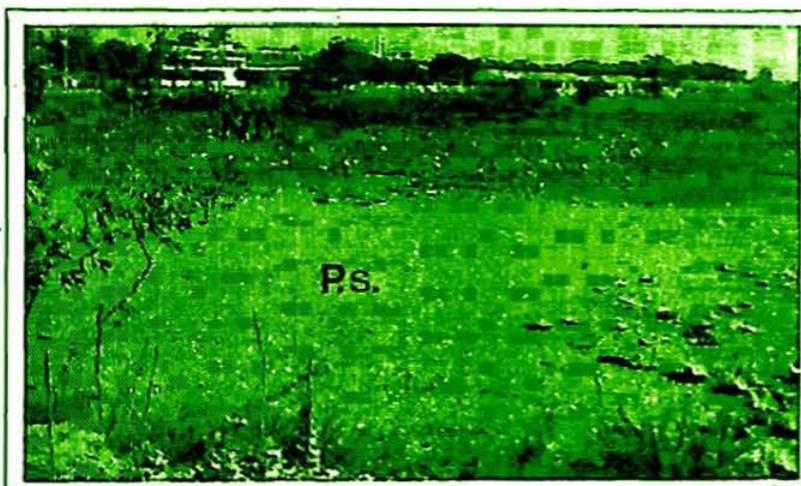
N.n.: *N. nucifera*

E.p.: *E. pyramidalis*



Lac 9 (Yamoussoukro)

N.n.: *N. nucifera*



Lac 10 (Yamoussoukro)

N.n.: *N. nucifera*

P.s.: *P. stratiotes*

PLANCHE IV : Vue photographique des lacs 8, 9 et 10 de YAMOUSSOUKRO

I.4.6 INFLUENCE DES FEUX DE BROUSSE SUR LES LACS

La combustion de la biomasse est, en milieu africain une source potentielle d'apports pour les plans d'eau. Cette combustion regroupe les feux de savanes, les feux de forêts et la combustion du bois pour produire de l'énergie. La quantité annuelle de biomasse brûlée est estimée à $2,9 \cdot 10^9$ tonnes de matière sèche [41], ce qui est loin d'être négligeable.

La combustion de biomasse entraîne une émission dans l'atmosphère de composés tels que CO, CO₂, CH₄, NO, NH₃ ... ; elle est aussi probablement responsable d'une augmentation de la concentration de l'ozone dans la troposphère au dessus de l'Afrique ; ce phénomène a été confirmé par des études de la composition chimique des pluies et des aérosols en milieu tropical et équatorial [42] ; [43].

Dans le cas particulier de la Côte d'Ivoire, il a été déterminé la composition des pluies juste après l'époque des feux de brousse à la station expérimentale de LAMTO (mois de février) ; ces pluies sont fortement acides (pH environ 4,5) et la concentration des ions ammoniacal, nitrates et sulfates est sensiblement plus élevée que durant le reste de l'année. A la fin de la saison sèche, la concentration en NH₄⁺ est par exemple de 58 µéq/L alors qu'elle se situe autour de 30 µéq/L en saison humide. Comme les précipitations sont une source d'apports de nutriments au plan d'eau, les feux de brousse peuvent donc avoir une influence sur l'eutrophisation [44].

I.4.7 MODELE MULTIDIMENSIONNEL DE SUIVI DE LA QUALITE DES EAUX DES LACS DE YAMOOUSSOUKRO

La classification des différents états trophiques de l'OCDE, réalisée à partir des valeurs des paramètres physico-chimiques (azote, phosphore, chlorophylle-a, profondeur du disque de Secchi) renferme des limites et d'insuffisances. Certains chercheurs ont pu montrer que la quantité de chlorophylle dans les algues pouvait varier de 0,1 à 9,7% de la masse des algues fraîches suivant les espèces [45].

Le tableau 1.7 présente les valeurs des seuils du système fixe de classification des états trophiques [31].

En utilisant ces critères de classification, tous les lacs de la ville de Yamoussoukro sont hypereutrophes à l'exception du lac 9, [24]. Ce résultat ne permet pas de différencier l'état trophique des lacs de Yamoussoukro alors que ces lacs semblent bien présentés des différences. L'approche statistique de la classification des états trophiques des lacs a permis de faire une nouvelle caractérisation.

L'Analyse des Composantes Principales (ACP), méthode statistique essentiellement descriptive utile pour présenter sous forme graphique le maximum d'informations contenue dans un tableau de données à permis la détermination de cinq variables (Potentiel redox, pH, Conductivité, Indice de permanganate et absorbance à 254nm) qui, avec un minimum de perte d'informations, permettent de suivre et même de prévoir l'évolution de la qualité des eaux au cours du temps. Ce modèle permet d'envisager les opérations de restauration des plans d'eaux [24].

Tableau 1.8 : Valeurs des seuils du système fixe de classification des états trophiques

<i>Degré de trophie</i>	<i>P-total µg/L</i>	<i>Chl-a moy µg/L.</i>	<i>Chl-a max µg/L.</i>	<i>Secchi moy m.</i>	<i>Secchi max m.</i>
Ultra oligotrophie	< 4	<1	<2,5	>12	>6
Oligotrophie	< 10	< 2,5	< 8	>6	>3
Mésotrophie	10-35	2,5-8	8-25	6-3	3-1,5
Eutrophie	35-100	8-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7
Hypertrophie	>100	>25	>75	<1,5	<0,7

Source : (OCDE, 1982)

Les travaux effectués sur les lacs jusque là ont été autour de l'étude de la pollution microbiologique, de la couverture végétale et des critères d'évaluation de la qualité de l'eau par une approche statistique. Pourtant, au niveau national, plusieurs de ces lacs qui ne sont pas encore pollués servent à la consommation humaine, à l'agropastorale et même revendues à certaines unités industrielles. L'idée d'une possible utilisation industrielle des eaux polluées en général n'a jamais été envisagée.

I.5 PRESENTATION DES DIFFERENTS TYPES DE TRAITEMENT DES EAUX

L'eau constitue la substance la plus abondante dans notre environnement. Elle constitue 70% de la masse humaine et couvre 80% de la surface terrestre. L'eau est relativement pure au niveau des lacs et des lagunes, salée dans les océans et approximativement pure solide dans les régions de neige (SIBERIE), glaciers et aux pôles.

Les exceptionnelles propriétés de l'eau ont un profond effet sur la nature de notre environnement, car elles permettent la régulation de la température du globe terrestre et maintiennent constante sa température.

La chaleur de vaporisation de l'eau (2250 kJ/kg à 100°C) est la plus élevée de tous les autres liquides. Elle permet de dissiper l'énergie solaire par l'effet de vaporisation des lacs, océans, lagunes, rivières et glaces [46].

Ce même phénomène permet de maintenir constante la température de l'organisme humain. En revanche, les propriétés de l'eau peuvent changer dramatiquement quand des substances étrangères y sont dissoutes. Ces substances étrangères peuvent entrer par des procédés naturels (mer) ou par d'autres manières dues aux activités humaines (pollution). En conséquence, toute utilisation de l'eau doit subir un traitement particulier conformément aux objectifs que l'on veut atteindre.

Le traitement est un procédé physico-chimique et/ou biologique appliqué à l'eau brute en vue de réduire, voire éliminer totalement certains ou tous les corps étrangers à l'eau. Il dépend de l'usage que l'on veut en faire. L'objectif en général est de procéder à l'élimination des matières en suspension et organiques colloïdales (turbidité, sable, argile, boue, bactérie, virus ...), des matières organiques dite "matières organiques naturelles" (oxydabilité au KMnO_4 , NTK, COT, ...), des matières organiques dissoutes indésirables et toxiques dites micro polluants organiques (pesticides, solvants chlorés, aromatiques ...) et des matières minérales dissoutes indésirables et toxiques dites micro polluants minéraux (azote ammoniacal, nitrates, métaux, ...). L'eau est utilisée dans plusieurs domaines d'activité en tant que eau de consommation (eau potable), eau d'irrigation ou eau industrielle [47].

I.5.1 TRAITEMENT DES EAUX DE CONSOMMATION

1.1.1.1.1

1.1.1.1.2 On appelle eau potable toute eau destinée à la consommation humaine ou à l'utilisation agropastorale. Ici, la santé de l'homme est la préoccupation majeure. Pour ce faire, le traitement de l'eau de consommation consiste à éliminer tous les êtres et toutes substances susceptibles de nuire à la santé de l'homme. Ce sont en général les matières organiques provenant de la décomposition des végétaux ou des animaux, les micro-organismes, les virus, les bactéries, les champignons, les nitrates, les métaux, les pesticides, les hydrocarbures...

Des procédés physico-chimiques, chimiques et parfois biologiques sont utilisés pour l'élimination des substances indésirables, toxiques et les micro-organismes.

En dehors des eaux fortement minéralisées, la production d'eau potable se résume en la **coagulation – floculation – décantation – filtration – oxydation ou désinfection**. [17] ; [48].

Les procédés de traitement des eaux sont nombreux et il est nécessaire de savoir d'abord les choisir, avant de bien les mettre bout à bout dans le bon ordre. La solution idéale n'existe pas et des filières souvent complexes, coûteuses et difficiles à conduire devront être mises en œuvre lors du traitement de certaines eaux superficielles eutrophisées ou sujettes à des pollutions diverses ou accidentelles. Les tableaux (annexe 13) caractérisent les directives sur la qualité de l'eau de consommation humaine [49].

I.5.2 TRAITEMENT DES EAUX USEES

On entend par eaux résiduaires, les eaux qui ont reçu des pollutions diverses par le fait d'activités anthropiques. Elles sont appelées « eaux résiduaires urbaines » (ERU) si elles sont polluées par l'activité des ménages ; « eaux résiduaires industrielles » (ERI) si leur contamination est due à une activité industrielle ou encore « eaux pluviales » (EPL) si elles sont issues d'une pluie (leur ruissellement occasionne une contamination par divers composés) [31].

Le but du traitement des eaux résiduaires est de préserver les écosystèmes aquatiques, les ressources en eau de la planète et d'éviter certains risques sanitaires. L'épuration des eaux résiduaires se fait à l'aide de procédés physico-chimiques, biologiques ou en assainissement autonome. Chacun de ces modes d'épuration est appliqué selon les caractéristiques physico-chimiques que présente l'eau à épurer. La quantification de la pollution est faite par

- La quantification de la pollution organique [la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO₅)] ;
- La quantification de la pollution azotée : l'azote Kjeldhal (NTK) « quantité de matière organique azotée oxydable dans les conditions de l'essai et d'ions ammoniums présents dans l'échantillon à analyser » ; des nitrates, des nitrites, de l'azote ammoniacal, et de l'azote total.
- La quantification de la pollution phosphorée déterminée par l'analyse des orthophosphates, des polyphosphates et du phosphore total.

- La quantification de la pollution particulaire qui est essentiellement déterminée par les matières en suspension (MES). [47]

I.5.3 TRAITEMENT DES EAUX INDUSTRIELLES

I.5.3.1 Traitement externe

On entend ici par eau industrielle toute eau utilisée pour le fonctionnement des unités industrielles. Il s'agit surtout de l'eau de service, de l'eau de refroidissement et des eaux de chaudière qui font l'objet de notre étude. Si le but principal lors de la production de l'eau potable (eau de consommation) est la préservation de la santé de l'homme, celui visé dans le cadre du traitement des eaux industrielles est surtout la sécurité « santé » du matériel mécanique, et le maintien des installations dans leur état de fonctionnement optimum sans courir trop de risques d'accidents ou d'incidents [50]. Le traitement approprié de l'eau d'alimentation de chaudière est une partie importante de l'opération et du maintien du système. Quand de la vapeur est produite, la concentration en solide dissous devient plus grande et forme des dépôts à l'intérieur de la chaudière. Ceci conduit à des faibles transferts de chaleur et réduit l'efficacité de la chaudière. Les gaz dissous tels que l'[oxygène](#) et le [dioxyde de carbone](#) réagissent avec les métaux dans les systèmes de chaudière et entraînent une corrosion. [15].

Tableau I.9: Gaz solubles dans l'eau d'alimentation [51]

Gaz Solubles			
IMPURETE	RESULTAT	S'ELIMINE PAR	COMMENTAIRES
Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)	Odeurs de l'eau nauséabonde: mauvais goût, et corrosif pour la plupart des métaux.	Aération, Filtration, et Chloration.	Se trouve principalement dans les eaux souterraines et les cours d'eau pollués.
Dioxyde de Carbone (CO ₂)	Corrosif, forme l'acide carbonique en condensat.	Désaération, neutralisation par alcalinisation.	Les amines neutralisantes sont utilisées pour empêcher la corrosion dans les circuits de condensas.
Oxygène (O ₂)	Corrosion (notamment par piquûre) des tubes de la chaudière.	Désaération & traitement chimique (Sulfite de Sodium ou Hydrazine)	Piquage de la tuyauterie, rupture dans les circuits de vapeur, etc.

Source : (LENTECH, 2005)

Afin de protéger la chaudière de ces contaminants, ils devraient être contrôlés ou éliminés, grâce à des traitements internes ou externes [52]. Dans les tableaux 1.9 et 1.110, nous présentons une liste de contaminants de l'eau d'alimentation des chaudières, leurs effets et les traitements possibles ainsi que des informations supplémentaires sur les [caractéristiques de l'eau d'alimentation des chaudières](#) [51].

Tableau 1.10 : Solides en suspension dans l'eau d'alimentation

Solides en Suspension			
IMPURETE	RESULTAT	S'ELIMINE PAR	COMMENTAIRES
Sédiment & Turbidité	Boue et primage calcaire.	Décantation et filtration.	Tolérance approximative de 5ppm max. pour la plupart des applications, 10ppm pour l'eau potable
Matière Organique	Primage, moussage, les dépôts peuvent colmater les canalisations et causer la corrosion.	Décantation ; filtration, et traitement chimique	Se trouve principalement dans l'eau de surface, causé par, notamment, la décomposition de la végétation. Les matières organiques se décomposent pour former des acides organiques. Le résultat est un pH d'eau d'alimentation faible, qui provoque l'attaque des conduites des chaudières. Il inclut les diatomes, les moisissures, les films biologiques, les bactéries manganiques/ferrique. Les particules suspendues se rassemblent à la surface de l'eau de la chaudière et rendent difficile la libération des bulles de vapeur remontant à la surface. Le moussage peut aussi être attribué à l'eau contenant des carbonates en solution dans laquelle un léger précipité flocculeux sera formé à la surface de l'eau.

Source : (LENTECH, 2005)

Tableau I.11 : Solides colloïdaux dissous dans l'eau d'alimentation

Solides Colloïdaux Dissous			
IMPURETE	RESULTAT	S'ELIMINE PAR	COMMENTAIRES
Huile & Graisse	Moussage, dépôts dans la chaudière	Coagulation & filtration	Entre dans la chaudière avec le condensas
Dureté , Calcium (Ca) , et Magnésium (Mg)	Dépôts calcaires dans la chaudière, empêche le transfert thermique, et l'efficacité thermique. Dans les cas graves peut mener à la brûlure ou à la rupture des tuyaux de la chaudière.	Adoucissement, plus traitement interne dans la chaudière.	Les formes sont, dans l'ordre, des bicarbonates, des sulfates, des chlorures et des nitrates. Certains sels de calcium sont réversiblement solubles. Le magnésium réagit avec les carbonates pour former des composés à faible solubilité.
Sodium , alcalinité, NaOH, NaHCO ₃ , Na ₂ CO ₃	Moussage, carbonates forment l'acide carbonate dans la vapeur, causent notamment la corrosion du séparateur d'eau de condensation, peuvent causer une fragilisation.	Désaération de l'eau d'appoint et de condensas de retour. Echangeur d'ion; Désionisation, traitement acide de l'eau d'appoint.	Les sels de sodium sont trouvés dans la plupart des eaux. Ils sont très solubles, et ne peuvent être éliminés par précipitation chimique.
Sulfates (SO ₄)	Entartrage important s'il y a présence de calcium	Désionisation	Les limites de tolérance sont environ 100-300ppm CaCO ₃
Chlorure (Cl)	Primage, i.e. entraînement par la vapeur d'eau et de sels dissous, peut provoquer des dépôts de sels dans les surchauffeurs et les turbines. Moussage si présent en grande quantité.	Désionisation	Le primage est causé par la concentration en carbonate de sodium, sulfate de sodium ou chlorure de sodium en solution. Le sulfate de sodium est trouvé dans beaucoup d'eaux aux USA, et dans les eaux où le calcium ou le magnésium est précipité avec le carbonate de sodium.
Fer (Fe) et Manganèse (Mn)	Dépôts dans la chaudière, en grande quantité peut inhiber le transfert de chaleur.	Aération, filtration, ion exchange.	La forme la plus courante est le bicarbonate de fer.
Silice (Si)	Entartrage important dans les chaudières et les systèmes de refroidissement.	Désionisation; procédé chaux/soude, traitement par zéolite.	La silice se combine avec de nombreux éléments pour former le silicate. Les silicates forment des dépôts très tenaces dans la chaudière. Très difficile à enlever, souvent seulement par acide fluorhydrique.

Source : (LENTECH, 2005)

Le traitement et le conditionnement de l'[eau d'alimentation de chaudière](#) doivent satisfaire trois objectifs principaux:

- L'échange continu de chaleur
- La protection à la [corrosion](#)
- La production de haute qualité de vapeur [53].

Le [traitement externe](#) est la réduction ou l'élimination des impuretés de l'eau avant l'admission dans la chaudière. En général, le traitement externe est utilisé quand la quantité des impuretés de l'eau d'alimentation est trop élevée pour être tolérée par le système de chaudière en question. Il y a différents types de traitement externe ([adoucissement](#), évaporation, [désaération](#), [contracteurs à membranes](#) etc.) qui peuvent être utilisés pour l'eau d'approvisionnement.

Ce système de traitement accomplit plusieurs fonctions telles que l'adoucissement, la réduction de l'alcalinité et de la silice, la réduction d'oxygène, l'élimination de la matière suspendue et de la turbidité. Le traitement chimique à l'intérieur de la chaudière est généralement essentiel et complète le traitement externe en faisant attention à ce qu'aucune impureté n'entre dans la chaudière avec l'eau d'alimentation (dureté, [oxygène](#), [silice](#), etc.).

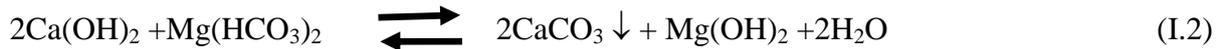
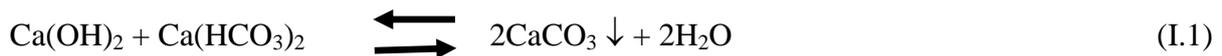
Aujourd'hui, les générateurs modernes exigent un appareillage permettant d'obtenir une eau possédant un plus haut degré de pureté.

Pour le moment, les seuls procédés qui satisfont le mieux aux exigences des constructeurs sont le traitement au moyen de réactions chimiques conduisant à la précipitation de matières et le traitement aux échangeurs d'ions [14].

a) **Décarbonatation à la chaux suivie d'un échangeur (RNa)**

La précipitation de matières au moyen de la chaux n'élimine aucun sel de sodium. Il a été amélioré et rendu plus efficace et désigné sous le nom de **décarbonatation**; la dureté restante est éliminée aux échangeurs d'ions. Ce procédé présente l'avantage d'être moins coûteux, plus rapide et efficace. [54]

Les réactions chimiques de la décarbonatation sont les suivantes :



b) Décarbonatation - adoucissement (RNa)

Le désavantage de l'adoucissement par échange de base est qu'il n'y a pas de réduction du TDS et de l'alcalinité. Il peut être surmonté par l'évacuation préliminaire de l'alcalinité et elle est généralement obtenue grâce à l'utilisation d'un décarbonateur.

Une installation avec décarbonatation évacue la dureté temporaire. Un décarbonateur est rarement utilisé seul (par exemple sans un adoucisseur par échange de base) car la solution produite est acide par nature et provoquerait la corrosion de même toute dureté permanente passerait directement dans la chaudière.

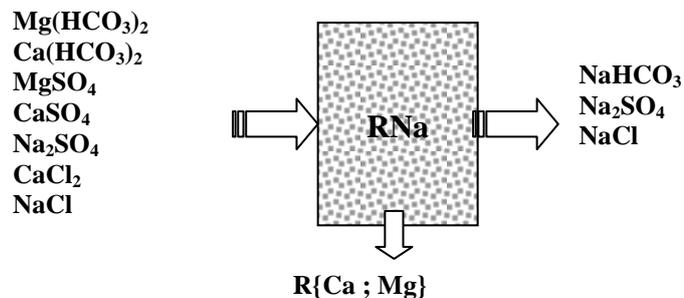


Figure 1.3 : Principe de l'adoucissement par échange d'ion

Ce procédé consiste à transformer tous les sels constituant la dureté en sels de sodium. L'échangeur utilisé est le RNa. Les équations chimiques de cet échange sont:



(NaZ représente la résine d'échange de sodium). Lorsque tous les ions sodium ont été remplacés par des ions calcium et magnésium, la résine doit être régénérée avec une solution de saumure. L'adoucissement par échange d'ions évite le besoin continu d'acide et d'antitartre dans l'alimentation. Il est préférable qu'une décarbonatation et une filtration précèdent l'adoucissement, surtout quand TAC > TH.

c) Traitement de l'eau par échangeurs d'ions ou déminéralisation

L'échange d'ions est un procédé chimique qui implique l'échange réversible d'ions pour les charges de même signe entre une phase solide (l'échangeur d'ions / résine) et une phase aqueuse [14].

Il implique le passage de l'eau brute à travers des résines d'échange de cations et d'anions.

Quelquefois, les résines peuvent être dans un seul réservoir et le procédé est appelé déminéralisation par «couche alternée». Le procédé évacue presque tous les minéraux et produit de l'eau de très bonne qualité ne contenant pas de sels dissous. Il est utilisé pour des chaudières à très haute pression comme celles des centrales thermiques. Si l'eau brute a une quantité élevée de solides en suspension, elle encrasse rapidement le matériel d'échange d'ions augmentant ainsi les coûts de fonctionnement. Dans ces cas, des prétraitements de l'eau brute comme la clarification ou la filtration sont nécessaires [53] [54].

- **Décarbonatation sur résines avec ou sans adoucissement**

La décarbonatation sur résines carboxyliques consiste à éliminer tous les bicarbonates de l'eau brute. Ce procédé convient pour une eau brute dont le $TAC > TH$ (eau chargée en bicarbonates de sodium).

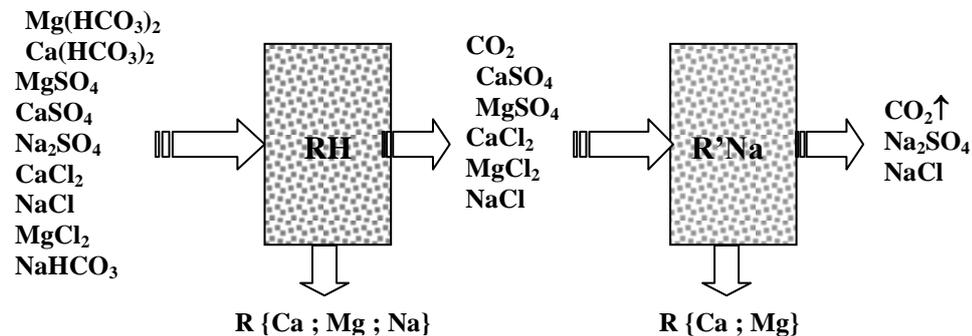


Figure 1.4 : Principe de la décarbonatation sur résines avec adoucissement

- **Déminéralisation totale**

La déminéralisation totale peut être obtenue :

- Soit en opérant sur les résines sulfoniques RH suivie d'une résine anionique ROH à faible basicité ; la silice n'est pas éliminée.
- soit en opérant sur les résines sulfoniques RH suivies d'une résine anionique R'OH à forte basicité ; la silice est éliminée.

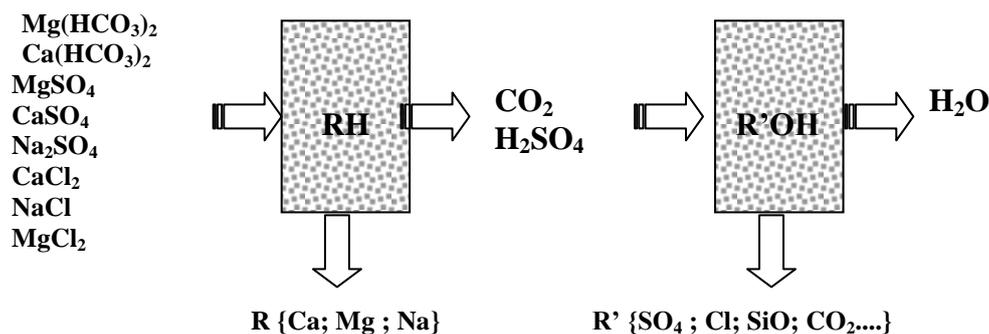


Figure 1.5 : Principe de déminéralisation totale

d) Les principaux types de résines échangeuses d'ions

La résine se présente sous forme de bille plastique. Dans la plupart des cas, cette bille est fabriquée à partir de polystyrène ou polyacrylate et réticulée à l'aide de divinylbenzène, puis par voie chimique, on greffe un groupement actif spécifique. La génération la plus récente de résines est la confection des résines à squelette polyacrylique ; ces produits ont une meilleure résistance à l'empoisonnement organique et une bonne stabilité mécanique. On rencontre d'autres formes de résines telles que les formophénoliques et les polyalkylamines. Il existe deux catégories d'échangeurs d'ions :

➤ **Les échangeurs de cations avec résines cationiques.**

- Les polystyrènes sulfonés (fortement acides) sont désignées par RNa ; ils sont capables d'échanger le cation Na contre les autres cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et sont désignés par RH ; quand ils sont capables d'échanger le H contre (Ca , Mg , Na ...). Ces résines sont également connues sous le nom de **résines sulfoniques**.
- Les résines carboxyliques (faiblement acide) sont désignées par RH . Comme les polystyrènes, elles n'ont pas la propriété de provoquer la scission des sels d'acides forts (sulfates et les chlorures de calcium, de magnésium et de sodium) si bien que ce sont uniquement les bicarbonates, les sels correspondant à un acide faible et l'acide carbonique CO_2 qui sont dissociés ; d'où le nom de décarbonatation donné à l'opération effectuée au moyen des résines carboxyliques.

➤ **les échangeurs d'anions avec résines anioniques**

Elles sont classées selon leur basicité.

- les échangeurs d'anions avec résines faiblement basiques, qui retiennent exclusivement les acides forts ou anions forts et sont désignés par ROH. Ces résines n'éliminent pas la silice ou le gaz carbonique.
- Les échangeurs d'anions avec résines fortement basiques qui retiennent les anions forts et faibles (tous les anions) et symbolisés par ROH.

- **Régénération des résines**

Les mesures de la conductivité et du taux de silice au cours du cycle permettent de contrôler la qualité de l'eau déminéralisée et de surveiller l'épuisement des résines.

Pour restituer aux résines les cations Na^+ , les cations H^+ ou les anions OH^- , une solution de NaCl ou NaOH ou HCl ou H_2SO_4 est introduite dans le système.

Dans la phase de régénération, on déplace l'équilibre dans le sens inverse par effet de concentration. Ainsi, les sels se dissocient et il y a échange de cations Ca^{++} et Mg^{++} contre Na^+ ou contre H^+ ou échange d'anions.

La phase de régénération est thermodynamiquement défavorisée compte tenu des valeurs de la sélectivité. Dans la pratique, il est donc très difficile de régénérer à 100% un échangeur d'ions ; même avec des concentrations très élevées de la solution régénérante.

- **Conditionnement de l'eau**

Le conditionnement de l'eau d'alimentation des chaudières, est une opération complexe qui permet la bonne conservation des appareils et de réaliser des conditions de marche favorables.

Elle consiste à ajouter à l'eau des corps possédant des propriétés physiques ou chimiques de sorte que ces corps soient susceptibles d'intervenir dans la recherche des objectifs suivants :

- obtenir que les caractéristiques de l'eau du générateur (alcalinité, salinité totale, teneur résiduelle en silice, dureté restante) soient entièrement conformes aux instructions du constructeur.
- éliminer les gaz dissous ou parfaire cette élimination si auparavant l'eau a déjà subi un dégazage ;
- atténuer les phénomènes de primage dans la chaudière elle-même ;
- protéger le circuit d'eau condensée en supprimant le caractère corrosif de cette eau ;
- assurer la protection des parois en contact avec elle ;

- éviter des dépôts dans les circuits de distribution d'eau chaude pour les usages domestiques et installations sanitaires.

Dans l'état actuel des choses, le conditionnement est toujours nécessaire même pour une eau ayant subi une déminéralisation totale ainsi qu'un dégazage poussé. Dans de nombreux cas, le traitement externe de l'eau d'approvisionnement n'est pas nécessaire et l'eau peut être traitée seulement par des méthodes internes.

I.5.3.2 Traitement interne

Le traitement interne consiste simplement à utiliser la chaudière elle-même, comme appareil assurant le traitement, c'est-à-dire à y introduire les réactifs et produits nécessaires en profitant ainsi de la température élevée et d'une certaine agitation de l'eau. Ces deux facteurs favorisent les réactions chimiques [55]

Cette opération doit être obligatoirement suivie de purges ou extractions périodiques et, parfois, des vidanges à des intervalles assez rapprochés dans les premiers temps de l'emploi du procédé afin d'en contrôler les résultats.

Le traitement interne a pour principal inconvénient la présence de matières diverses dans le contenu du générateur « charge ou surcharge, matières indésirables ».

C'est pourquoi ce genre de traitement ne peut être appliqué que pour des chaudières à vapeur utilisées pour le chauffage et dont la pression de marche est relativement faible.

Les principaux produits utilisés sont des réactifs qui contiennent des éléments alcalinisants, dispersants, réducteurs, stabilisants ; ces derniers ayant pour but de retarder les réactions [11].

Le traitement interne peut constituer l'unique traitement lorsque les chaudières opèrent à une pression faible ou modérée, lorsqu'une large quantité de vapeur condensée est utilisée pour l'eau d'alimentation, ou lorsque la qualité de l'eau brute est bonne. Le but d'un traitement interne est de :

- réagir avec la dureté de l'eau d'alimentation et l'empêcher de précipiter avec le métal de la chaudière (tartre);
- conditionner n'importe quelles matières en suspension telles les boues, la dureté ou l'oxyde de fer dans les chaudières et de les rendre non adhérentes au métal de la chaudière;

- assurer une protection anti-moussage pour permettre une concentration raisonnable en solides dissous et en suspension dans la chaudière sans risque de primage;
- éliminer l'oxygène de l'eau et d'assurer une alcalinité suffisante pour empêcher la corrosion dans la chaudière.

De plus, en tant que mesure supplémentaire, un traitement interne devrait empêcher la corrosion et l'entartrage dans les systèmes d'alimentation d'eau et protéger les systèmes de condensat de vapeur contre la corrosion. Pendant le procédé de traitement, qui est un complément essentiel au programme de traitement à l'eau, des doses spécifiques de produits de traitement sont ajoutés à l'eau. Les produits couramment utilisés incluent:

a) Addition d'Acide ou acidification

L'addition d'acide détruit les ions carbonates, éliminant un des réactifs nécessaires pour la précipitation du carbonate de calcium. Ceci est très efficace pour empêcher la précipitation du carbonate de calcium, mais inefficace pour empêcher les autres types de tartres. De plus, d'autres risques surviennent notamment, la corrosivité de l'acide, le coût des réservoirs et des équipements de surveillance et le fait que l'acide abaisse le pH du perméat d'osmose inverse [51].

b) Addition d'antitartres

Ce sont des matériaux tensioactifs qui interfèrent avec les réactions de précipitation selon trois voies principales:

- Inhibition d'effet de seuil qui est la capacité d'un antitartre à maintenir la solubilité d'une substance au-delà de ses limites normales.
- Modification cristalline qui est la propriété des antitartres de déformer les structures cristallines, ayant pour résultat la formation de tartre non adhérent. [51].
- Dispersion qui est la capacité de certains antitartres à absorber les cristaux ou les particules colloïdales et de donner une charge anionique élevée, qui tend à maintenir les cristaux séparés. La charge anionique élevée sépare aussi les particules des charges anioniques fixées présentes sur la surface des membranes.

Il existe divers types d'antitartres aux fonctions multiples:

- Les Dispersants phosphates, dispersants polyphosphates (produits chimiques d'adoucissement) qui réagissent avec l'alcalinité de l'eau et neutralisent la dureté de l'eau des chaudières en formant le phosphate tricalcique. Les composants insolubles peuvent être disposés et purgés de façon continue ou périodique par le bas de la chaudière.
- Les Dispersants naturels et synthétiques (agents antitartre) augmentent les propriétés dispersives des produits de traitement. Ils sont constitués essentiellement des polymères naturels (lignosulfonates de calcium, tanins), les polymères synthétiques (polyacrylates, copolymère acrylique maléique, copolymère styrène maléique, polystyrène sulfonates etc.)
- Les Séquestrant tels que les phosphates inorganiques qui agissent comme des inhibiteurs.
- Les Réducteurs d'oxygène tels que le sulfite de sodium, les tanins, les hydrazines, les dérivés d'hydroquinone, les dérivés d'hydroxylamine, les dérivés d'acide ascorbique, etc. Ces réducteurs, catalysés ou non, réduisent les oxydes et l'oxygène dissous. Le choix du produit et la dose requise dépendront de la manière dont le dégazeur thermique est utilisé.
- Les agents anti-moussage et anti-primage sont des mélanges d'agents tensio-actifs qui modifient la tension de surface d'un liquide, éliminent le moussage et empêchent le primage des particules fines de l'eau dans la vapeur. [51]

c) **Traitement des boues**

Il y a deux approches générales pour le traitement des boues à l'intérieur d'une chaudière (par coagulation ou par dispersion). Lorsque la quantité totale de boue est élevée (comme résultat de dureté élevée d'eau d'alimentation), il est préférable de coaguler les boues pour former des particules flocculeuses. Celles-ci peuvent être éliminées par vidange. La coagulation peut être obtenue par l'ajustement soigneux des quantités d'alcalis, de phosphates et de composés organiques utilisés pour le traitement. Quand la quantité de boue n'est pas trop élevée (faible dureté de l'eau d'alimentation) il est préférable d'utiliser un haut pourcentage de phosphates dans le traitement. Les phosphates forment des particules séparées de boue. Un haut pourcentage en dispersants de boue organique est utilisé dans le traitement pour garder les particules de boue dispersées dans toute l'eau de chaudière. Les matières employées pour conditionner les boues incluent divers matériaux organiques de tanins, de

lignine ou d'alginate. Il est important que ces produits organiques soient décelés et traités, ainsi, ils sont à la fois efficaces et stable à la pression de travail des chaudières.

I.5.3.3 Traitement par les méthodes physiques

a) Elimination de la dureté par nanofiltration.

Le souci de cette méthode est d'éliminer les ions sulfates qui présentent un goût inacceptable dans les eaux de consommation. Or, le recourt au traitement chimique par ajout d'hydroxyde de sodium, où, il se forme un précipité d'hydroxyde de magnésium qui serait éliminé dans les bassins de décantation ne change pas la concentration de sulfates.

Le recourt également à l'échange d'ions requiert une reminéralisation des eaux produites pour une éventuelle consommation.

En outre, si l'échange d'ions est un procédé économique pour la préparation d'eau déminéralisée à partir d'eau ayant une faible salinité (<1g/l), le traitement de l'eau hyperminéralisée provoque une forte consommation de produits chimiques surtout pour la régénération des résines.

Il est donc possible de traiter l'eau dure hypersulfatée, par l'osmose inverse, puisque les membranes ayant des diamètres de pores de l'ordre d'un angström laissent passer le solvant (l'eau pure) et retiennent presque tous les sels. En effet, les membranes d'osmose inverse n'ont pas de perméabilité sélective pour les sels, et les pressions nécessaires au traitement sont élevées, plus de 20 à 70 bars selon la concentration des sels contenus dans l'eau à traiter. Il faut noter que l'osmose inverse s'accompagne d'une consommation d'énergie et elle s'applique pour la production d'eau ultra pure nécessaire aux procédés industriels.

Les résultats obtenus par nanofiltration dans la recherche de traitement des eaux synthétiques ont montré clairement la possibilité d'élimination des ions calcium, magnésium et sulfates, responsables de la dureté sulfatée avec une efficacité supérieur à 75% même à faible pression (5 bars), et avec des taux de conversion relativement élevés (plus de 70%).

Les membranes de nanofiltration ont une sélectivité de rétention vis à vis des sels. Elles retiennent mieux les ions polyvalents par rapport aux ions monovalents. Pour ce faire, il est intéressant d'utiliser ces membranes pour traiter les eaux dures et hypersulfatées parce qu'elles retiennent assez bien les ions indésirables. Grâce à ces avantages, la nanofiltration a commencé à concurrencer l'osmose inverse dans le domaine du traitement des eaux

saumâtres. Les membranes de nanofiltration sont aussi utilisées pour éliminer les métaux lourds des effluents industriels, et pour retenir, par ailleurs, les matières organiques [20].

b) Traitement électromagnétique des eaux de chaudière

Ce procédé électrostatique a pour principe un champ électrique ou magnétique qui charge électrostatiquement les ions Ca^{++} et Mg^{++} et les empêche de se déposer sur les parois. Les sels ne s'incrustent pas, mais précipitent. Il est donc nécessaire de prévoir des dispositifs de purges [56]. Le traitement électromagnétique de l'eau est utilisé pour prévenir tout dépôt ou toute corrosion dans les installations de chauffage. En remplacement de la méthode conventionnelle de traitement chimique, le traitement électromagnétique présente les avantages suivants :

- le matériel est facile à contrôler
- la pollution environnementale est virtuellement éliminée
- la dureté de l'eau est éliminée
- la corrosion est considérablement réduite
- la consommation en combustible est réduite à cause de l'amélioration des conditions d'échanges thermiques [57].

Notons que l'équipement est très coûteux ; mais revient dans l'ensemble, économique à long terme, en tenant compte des avantages offerts par le faible coût de maintenance.

I.6 PRESENTATION DE LA CHAUFFERIE INDUSTRIELLE

Une chaufferie industrielle est composée en général d'organes mobiles (pompes, ventilateurs ou aspirateurs de recyclage, turbines, alternateurs...) et d'organes fixes (chaudières ou générateurs de vapeurs, bêche alimentaire, surchauffeurs, économiseurs, condenseur, conduites ...) [57] ; [58].

I.6.1 CHAUDIERES

Une chaudière est une unité qui permet de générer de la vapeur. Elle est composée de deux parties: le four, qui fournit la chaleur, habituellement en brûlant des combustibles et la chaudière dans laquelle la chaleur transforme l'eau en vapeur. La vapeur ou le fluide chaud

sont alors recyclés hors de la chaudière après diverses applications de chauffage. Le circuit d'eau d'une chaudière peut être résumé suivant le schéma de la figure 1.4. La chaudière reçoit l'eau d'alimentation, qui est composée de diverses proportions d'eau condensée et récupérée (eau de retour) et d'eau douce, qui a été purifiée à des degrés variables (eau d'appoint). L'eau d'appoint est généralement de l'eau naturelle à l'état brut, ou traitée par certains procédés. La [composition de l'eau d'alimentation](#) dépend ainsi de la qualité de l'eau d'appoint et de la quantité de condensat qui retourne dans la chaudière. La vapeur, qui s'échappe de la chaudière, contient fréquemment des gouttelettes liquides et des gaz. L'eau restante sous forme liquide au bas de la chaudière ramasse toutes les matières organiques étrangères provenant de l'eau convertie en vapeur. Les impuretés doivent être purgées par des rejets d'une partie de l'eau par les drains. Le pourcentage permis de vidange pour une usine est limité par les coûts de fonctionnement et les investissements initiaux.

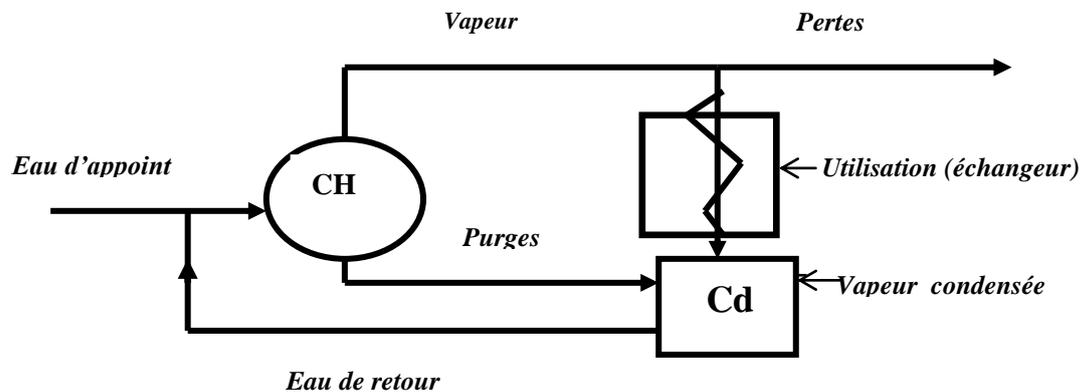


Figure 1.6 : Principe d'alimentation d'une chaudière en eau

La tendance est de réduire ce pourcentage. Historiquement les chaudières vapeur ont toujours nécessité un haut niveau de surveillance pour obtenir un degré de sécurité suffisant. De nos jours, les installations doivent pouvoir répondre aux attentes des utilisateurs aussi souvent que possible ; cela signifie que certaines chaudières travaillent en continu ou au contraire s'arrêtent sur des intervalles de temps courts ou longs [14]. Dans tous les cas, les technologies modernes exigent que la chaudière soit dans un régime le mieux adapté à l'application avec des éléments de régulation efficaces pour fournir le rendement et la sécurité requis. La chaudière est souvent l'élément le plus gros d'une installation vapeur. Sa plage de fonctionnement est définie en fonction des paramètres de l'installation. Souvent, plusieurs chaudières sont utilisées pour répondre aux fortes demandes quand des variations de charges existent. Les chaudières modernes se fabriquent dans des gammes importantes pour répondre

à des débits de plus en plus importants. On peut classer les chaudières en deux catégories : les chaudières à tubes de fumées et les chaudières à tubes d'eau [21].

I.6.1.1 Chaudières à tubes de fumées

Ces chaudières fonctionnent en véhiculant la chaleur dans les tubes situés en position horizontale et en transférant l'énergie à la masse d'eau contenue dans l'enveloppe cylindrique. Il y a différentes configurations possibles en fonction du nombre de passes dans lesquelles, à partir du foyer de la chaudière, les fumées sont véhiculées vers l'extérieur.

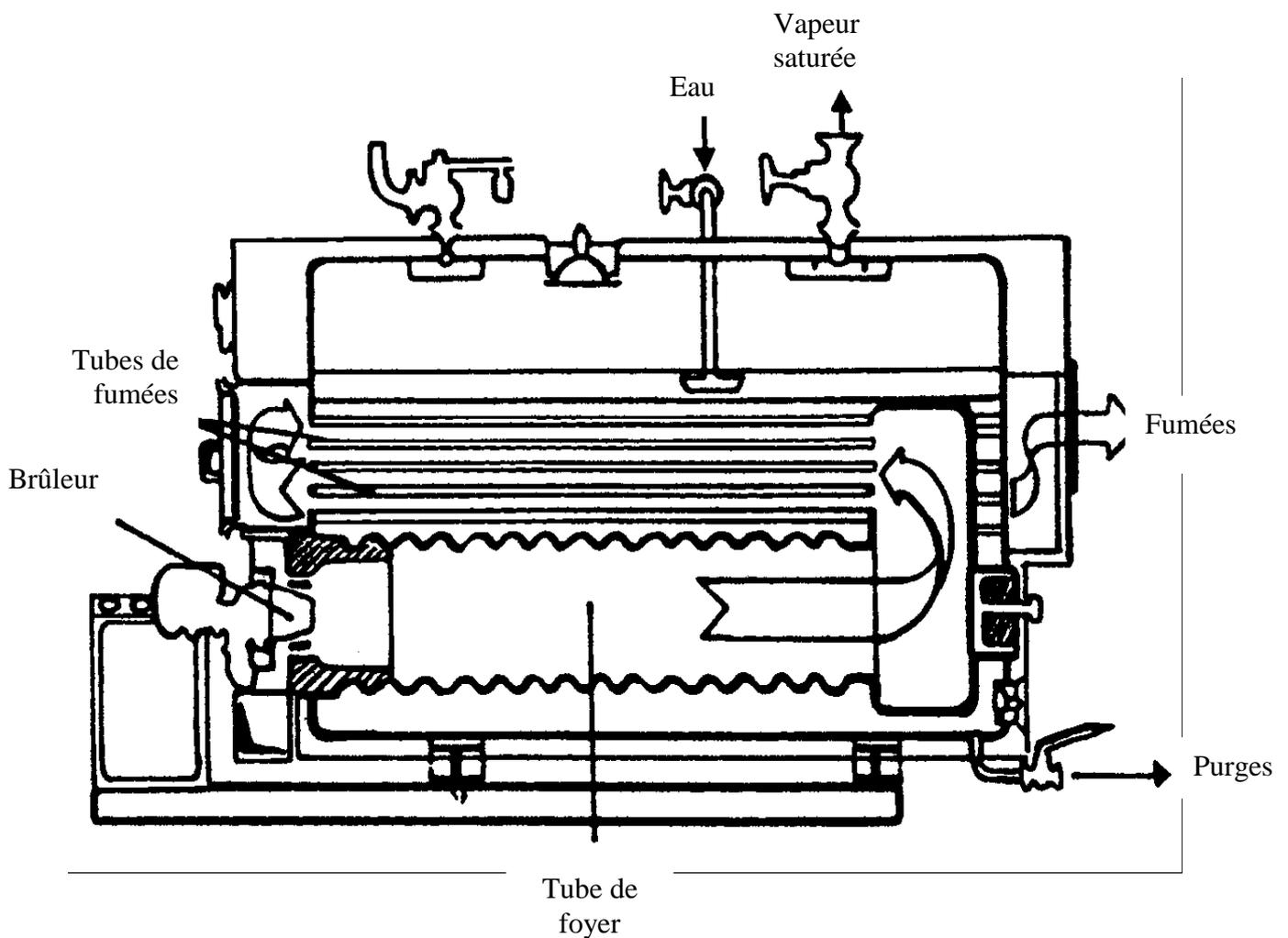


Figure I.7 : Coupe d'une chaudière à tubes de fumées.

I.6.1.2 Chaudières à tubes d'eau

Les chaudières à tubes d'eau diffèrent des chaudières à tubes de fumées car l'eau circule à l'intérieur des tubes et la source de chaleur est à l'extérieur. Ceci implique des limites de pression beaucoup plus élevées car la contrainte circonférentielle est plus faible. Ces chaudières sont utilisées lorsque l'on souhaite des productions de vapeur à des pressions importantes ou de la vapeur surchauffée. Elles sont beaucoup plus onéreuses que les chaudières à tubes de fumées qui sont plus compactes. Les pressions peuvent atteindre 270 bars. La gamme s'étend de 2000kg/heure à 3500 tonnes/heure.

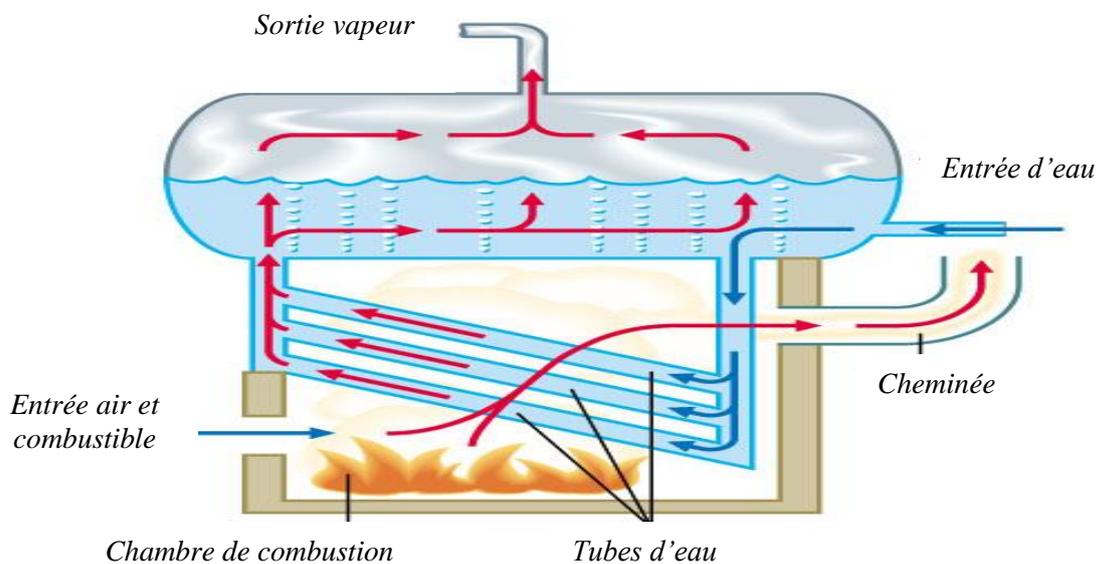


Figure 1.8 : Coupe d'une chaudière à tube d'eau (LENTECH, 2005)

I.6.1.3 Bâche d'alimentation

Une bâche d'alimentation dans une chaufferie de production vapeur, est la zone de rencontre et de mélange entre l'eau traitée d'appoint et le retour des condensas (eau d'appoint + eau de retour). Elle a pour principales fonctions de servir de réservoir d'eau pour équilibrer le débit d'alimentation de la chaudière; le stockage thermique des calories provenant des condensas recyclés et des systèmes de récupération de chaleur (purgés). Elle sert également à préparer l'eau d'alimentation de la chaudière et à maintenir constante et élevée la température de l'eau fournie à la chaudière.

Les bâches d'alimentation sont de formes cylindriques ou rectangulaires et sont construites soit en acier au carbone (enclin à la corrosion), soit en plastique (moins utilisé compte tenu du coût élevé des plastiques capables de supporter des hautes températures) ou

en acier inoxydable austénitique (son coût initial est élevé mais la durée de vie de la bache justifie ce coût). Le seul désavantage technique de ce dernier matériau est qu'il peut être sujet à la corrosion provoquée par les chlorures en concentration élevée à des températures supérieures à 60°C [5].

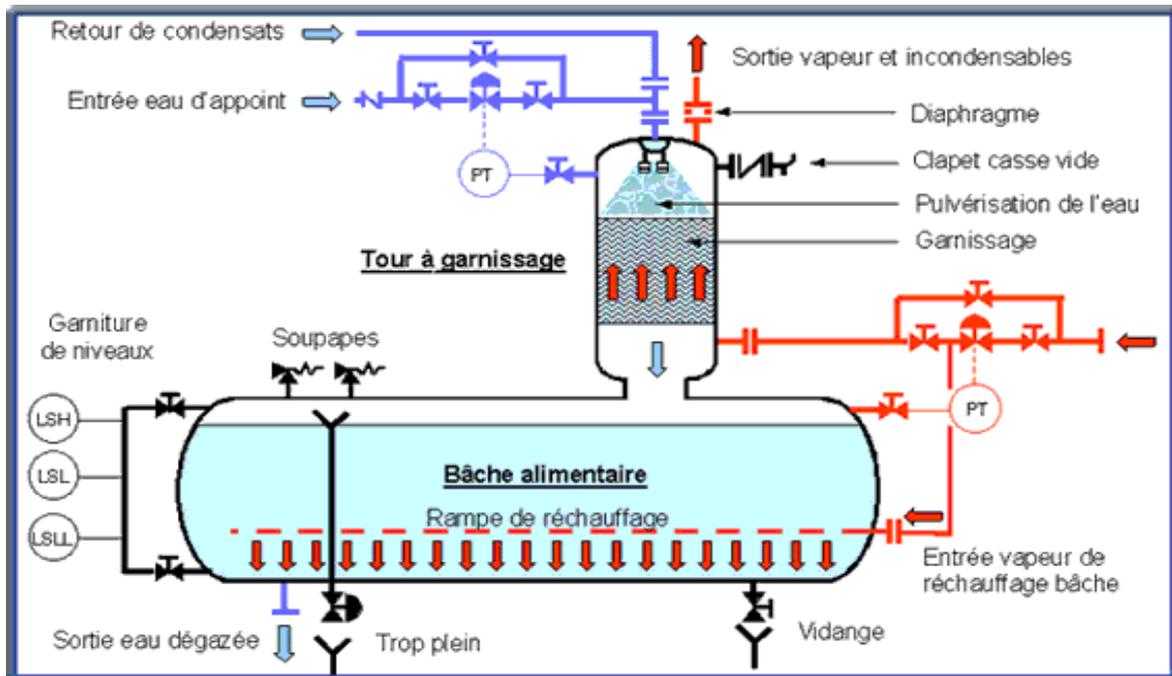


Figure 1.9 : Schéma d'un dégazeur et d'une bache d'alimentation avec système de protection par soupapes [53]

I.6.2 CONDUITES D'EAU

La canalisation d'eau est l'ensemble des conduites d'eau dans l'installation. Le choix des conduites tient compte de la qualité d'eau à véhiculer, de la température de l'eau et du milieu dans lequel elles sont installées et de la pression de service. Le diamètre des conduites est choisi dans certains guides selon soit la méthode des vitesses ou des pertes de charges [55].

$$D = f(Q_m, T_s, P_s, v_p) \text{ ou } D = f(Q_m, T_s, P_s, \Delta P)$$

Avec, D : diamètre (mm) ; Q_m : débit de la vapeur (kg/h) ; T_s : température de surchauffe (°C) ; P_s : pression de service (bar) ; ΔP : pertes de charges dans le circuit (bar) ; v_p : vitesse de la vapeur (m/s).

A vitesse constante le diamètre de la conduite est également donnée par :

$$D = (4Q_v / \pi \cdot v_p)^{1/2} \quad (I.5)$$

Par ailleurs, les conduites dans les installations de chaufferie sont généralement en acier inoxydable, en acier au carbone, en fonte, en bronze ou en divers autres alliages selon que ce matériau respecte les normes de sécurité.

I.6.3 POMPES

Les pompes sont des organes mécaniques, génératrices d'énergie assurant le transfert d'un fluide. Les pompes sont des auxiliaires dans les installations industrielles ou domestiques. Dans une tranche de production thermique on dispose d'un nombre important de pompes, assurant les fonctions principales et de servitudes auxiliaires. Suivant le mode de déplacement du liquide entre les régions d'aspiration (entrée du liquide) et de refoulement (sortie du liquide) on peut classer les pompes en deux catégories :

Les pompes à déplacement (volumétriques) et les turbopompes.

On peut très approximativement fixer comme suit les limites d'utilisation des différents types de pompes:

- Les pompes centrifuges :
 - Pompes centrifuges à faible débit et pression moyenne (pompes d'extraction, de reprise des purges) ;
 - Pompes centrifuges à pression élevée ; ces pompes sont multicellulaires (pompes alimentaires)
- Les pompes hélico-centrifuges et pompes à hélice à grand débit et faible hauteur de refoulement (pompes de circulation d'eau de condenseur) ;
- Les pompes volumétriques à faible débit, forte pression et liquide de viscosité élevée (pompe d'injection de réactif dans le circuit d'eau du générateur de vapeur, pompes à fuel-oil, ...)

Outre les conditions de débit qui ont des répercussions sur la puissance et par conséquent sur le dimensionnement, les pompes sont destinées à véhiculer des fluides divers, à des températures diverses ; ce qui exige des conceptions spéciales [59].

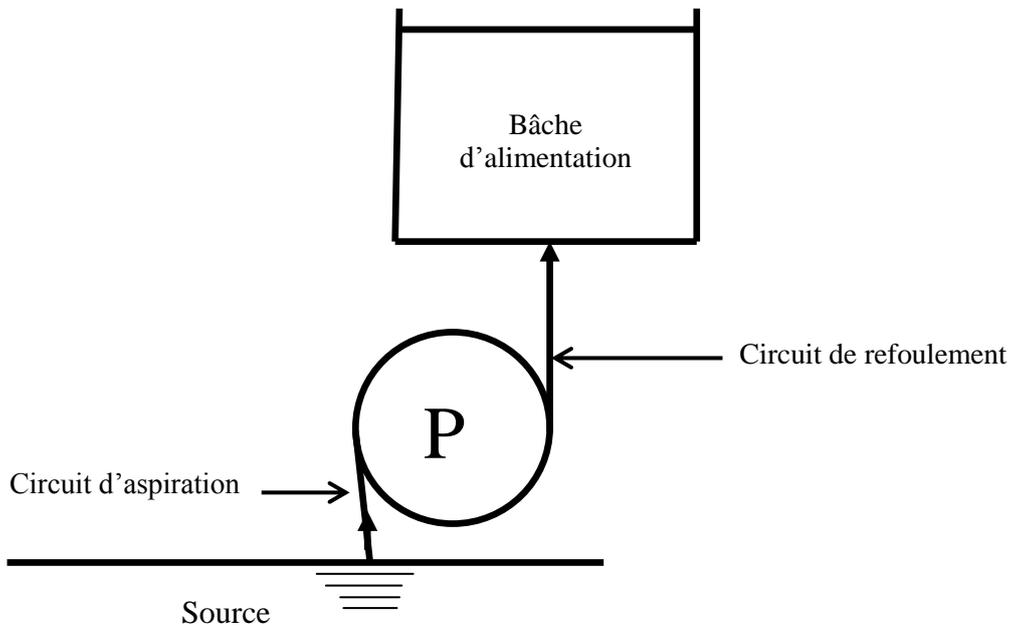


Figure 1.10 : Schéma simplifié d'une installation de pompage

Les tableaux 1.11 et 1.12 présentent les avantages et les inconvénients de différents types de pompes utilisés dans les installations de chaufferie industrielle.

Tableau 1.12 : Avantages et inconvénients des pompes centrifuges

	AVANTAGES	INCONVENIENTS	UTILISATIONS
Général	Débit stable Faible prix Faible encombrement Fiable	Pas Autoamorçante Débit et pression de transport interdépendants Faible rendement	Débites importants Liquides purs et suspensions
Pompe à entraînement magnétique	Pas de système d'étanchéité Pas de pollution du liquide	Sensible aux particules Température limitée Puissance limitée	Liquides purs, toxiques, corrosifs
Pompe à rotor noyé ou pompe immergée	Pas de système d'étanchéité Pas de pollution du liquide	Sensible aux particules	Liquides purs, toxiques, corrosifs

.../...

Tableau I.13 : Avantages et inconvénients des pompes volumétriques rotatives

	AVANTAGES	INCONVENIENTS	UTILISATIONS
Pompes à engrenages ; à vis ; à lobes	Débit réglable Débit régulier Précision du débit Rendement élevé Encombrement réduit	Sensibles aux particules Sensible aux liquides corrosifs Mécanique compliquée	Liquides purs et visqueux P → 100 bars, Q _v → 150 m ³ /h
Pompes péristaltiques Pompes à piston oscillant	Débit réglable Précision du débit Résistant aux liquides corrosifs Autoamorçante Peu sensible aux solides et suspensions	Débites par à-coups Température de service limitée Usure du tuyau ou membrane	Liquides corrosifs et chargés P → 4bars, Q _v → 20 m ³ /h
Pompe à vis excentriques	Débit réglable Peu sensible aux solides et suspensions Stator facile à remplacer	Encombrement important Température de service limitée Usure du stator Sensible aux liquides corrosifs	Liquides chargés et visqueux P → 10 bars, Q _v → 150 m ³ /h

I.6.4 ACCESSOIRES DE SECURITE ET DE REGULATION

Ces éléments sont nécessaires pour l'équipement des chaudières ainsi que leurs auxiliaires en vue d'assurer à tout instant un bon fonctionnement pendant l'exploitation, ceci dans le but d'assurer la sécurité des personnes et du matériel et d'optimiser l'économie du combustible et du fluide caloporteur ainsi que la longévité du matériel.

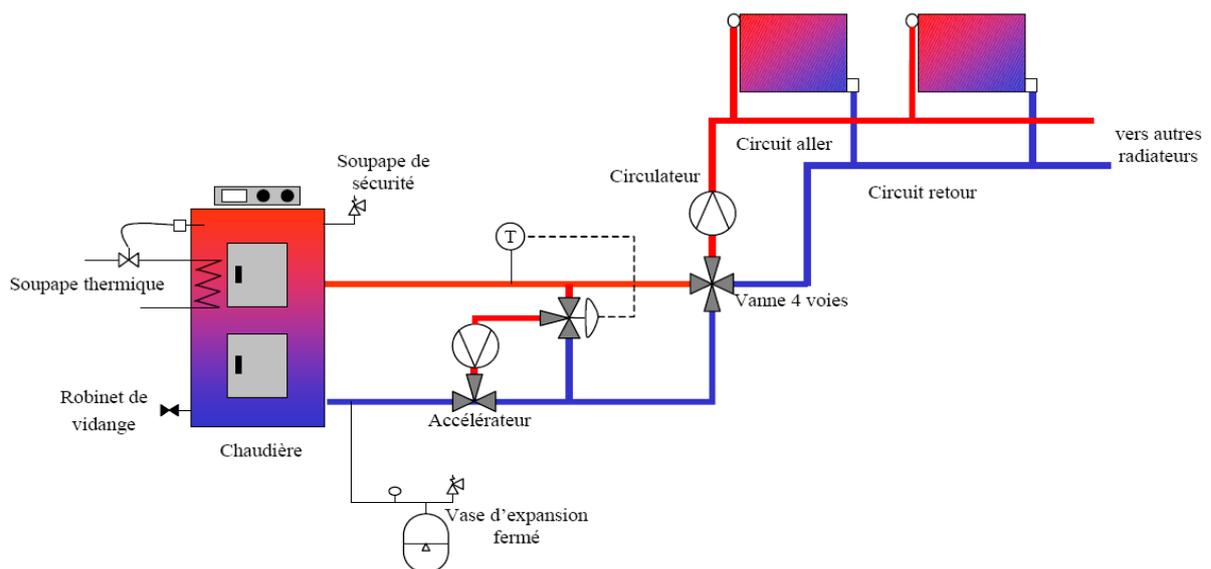


Figure I.11 : Circuit de chauffage avec organes de régulation et de sécurité

I.7 CONCLUSION PARTIELLE

Les résultats des travaux effectués sur les lacs ont montré que les lacs sont pollués et ont une couverture végétale au delà de la normale. De telles eaux ne sont pas conseillées et ne peuvent pas être admises dans les chaudières car dans tous les schémas de production d'eau potable ou industrielle, les exploitants utilisent les eaux non polluées. Ils sont même prêts à parcourir des kilomètres pour se ravitailler en eau « propre ». L'objet de notre travail est d'utiliser les eaux polluées pour le fonctionnement des unités de production de vapeur. Dans le chapitre suivant, nous procéderons à l'analyse physico-chimique des eaux de 10 des lacs de la ville de Yamoussoukro, capitale politique de la Côte d'Ivoire.

CHAPITRE I I:

ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES LACS

INTRODUCTION

II.1 PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE

II.2 CONDITIONS DE PRELEVEMENT

II.3 MATERIELS ET METHODES

II.4 ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

II.5 CONCLUSION PARTIELLE

INTRODUCTION

Cette partie de l'étude présentera brièvement les lacs de la ville de Yamoussoukro et leur environnement. Dans l'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux de chaque lac, nous tenterons de donner les causes environnementales, les interactions chimiques et biochimiques qui ont influencé les caractéristiques des eaux. Nous essaierons ensuite de ressortir les effets de chacun des paramètres sur la chaufferie industrielle. Mais avant tout, nous décrirons les conditions expérimentales et les matériels utilisés pour l'analyse des eaux.

II.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

II.1.1 LE SYSTEME LACUSTRE DE LA VILLE DE YAMOUSSOUKRO ET SES ENVIRONS

La ville de Yamoussoukro, capitale politique de la Côte d'Ivoire, est dans le centre du pays à 270km au Nord-Est d'Abidjan. Elle est à 6°7' de latitude Nord et à 5°2' de longitude Ouest. Yamoussoukro est dotée d'un ensemble de lacs artificiels, qui ont été aménagés dans les années 1970. Notre étude s'est portée sur dix d'entre eux numérotés de 1 à 10. Ils sont alimentés par deux cours d'eau et communiquent entre eux (Planche I).

Ce système lacustre présente un intérêt particulier pour mener des études comparatives car, les lacs sont le siège d'apports exogènes variables, suivant leur localisation. La conséquence de ses apports exogènes est la couverture végétale de la majeure partie des lacs, notamment par les *numphaea lotus* (nénuphars), les *pistia stratiotes* (salades d'eau), les *eichhornia crassipes* (jacinthes d'eau) et les *nelumbo nucifera* (lotus).

II.1.2 CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES ET GEOGRAPHIQUES

Le climat de la région de Yamoussoukro est de type tropical humide de transition. Il est caractérisé par une longue saison sèche (de novembre à février) et une saison des pluies ayant deux maxima, l'un en mai ou juin et l'autre en septembre ou octobre. La température moyenne est de 25.6°C, avec des variations mensuelles généralement inférieures à 3°C et des variations journalières pouvant atteindre 10°C. La pluviométrie moyenne est de 1150mm. Le stratum rocheux du terrain expérimental est constitué principalement de granitoïdes alcalins. Ce socle est recouvert par des altérites, riches en oxydes de fer et d'aluminium. Les

sols de la région étudiée sont homogènes : il s'agit de sols ferrallitiques moyennement ou fortement désaturés [60].

II.1.2.1 Pluviométrie

La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 1150mm durant les vingt cinq dernières années. Cependant, depuis quelques années de fortes variations se font sentir sur la répartition des pluies.

Tableau 2.1 : Hauteurs mensuels de pluies en mm à Yamoussoukro

	<i>J</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>A</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	Total
1996	6	71	51	87	281	180	199	144	60	85	12	2	3174
1997	90	0	101	187	150	185	53	21	54	147	10	62	3057
1998	0	1	51	132	82	265	53	36.5	97.5	92.5	85	14	909.5

Source : (station de Rhône-Poulenc)

II.1.2.2 Influence de la pluviométrie sur les variables physico-chimiques.

Le nombre de paramètres qui dépendent linéairement de la pluviométrie dans les lacs de la ville de Yamoussoukro est assez faible d'après une étude menée sur deux années [24]. Ce résultat, à priori surprenant, semble indiquer que les précipitations ont une influence négligeable sur les variations des paramètres ou qu'elles sont à l'origine de plusieurs effets antagonistes qui se compensent mutuellement.

En effet la pluviométrie provoque la dilution des masses d'eau, surtout en milieu tropical [61], ce qui entraîne une baisse de la concentration des différents composés présents dans ces eaux. En plus de la dilution, il faut tenir compte du lessivage des sols qui draine vers le plan d'eau des quantités parfois importantes de micropolluants. La dissolution de ces éléments aura l'effet inverse du précédent et tendra à augmenter la concentration de plusieurs espèces chimiques.

II.1.2.3 Insolation

La région de Yamoussoukro est fortement ensoleillée en moyenne dix (10) mois sur douze (12) de l'année. Seuls les mois de juillet et d'août subissent l'influence du couvert

nuageux qui diminue considérablement le nombre d'heures d'ensoleillement. La moyenne d'ensoleillement est de l'ordre de 1940 heures.

II.1.2.4 Température (T)

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 25.6°C avec des faibles variations mensuelles (environ 3°C) et des fortes variations journalières pouvant atteindre 10°C. L'humidité relative moyenne annuelle est de l'ordre de 75% avec un minimum de 63% en janvier et un maximum de 80% en juillet à cause de la saison des pluies [24].

II.1.2.5 Population et système d'assainissement.

La population de Yamoussoukro est environ de 180.000 habitants. Le réseau de récupération des eaux usées est quasi-inexistant. Le système d'assainissement autonome (fosses sceptiques) est le plus développé dans la ville pour les habitats privés. L'âge et la qualité des certaines habitations sont de nature à favoriser le déversement des eaux usées dans les lacs.

II.1.2.6 Le système lacustre

Yamoussoukro est dotée d'un ensemble de lacs artificiels, qui ont été aménagés dans les années 1970. Dix d'entre eux ont fait l'objet de cette étude, et ont été numérotés de 1 à 10.

Ces lacs sont alimentés par deux rivières et communiquent entre eux. Les superficies des lacs et de leur bassin versant (B.V) sont indiquées dans le tableau 2.2. La profondeur des lacs est en général inférieure à 3 m.

Tableau 2.2 : Superficie des lacs et des bassins versants [62]

<i>N° lac</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
Superficie lac (km²)	0.15	0.14	0.08	0.09	0.45	0.10	0.08	0.10	0.10	0.11
Superficie B.V (km²)	7.50	1.25	1.00	1.10	3.75	2.05	1.45	1.10	1.00	3.80
Superficie cumulée B.V (km²)	7.50	8.75	9.75	10.85	21.9	24	1.45	5.90	4.80	3.80

Source :(BERNARD PARINET et coll., 2004)

II.1.2.7 Environnement des lacs

Les observations faites sur l'environnement des lacs pendant l'étude fait transparaître les données suivantes consignées dans les tableaux 2.3 et 2.4

Tableau.2.3 : Description de l'environnement des 10 lacs

Code	Position dans la ville	Activités aux alentours	Etat d'invasion des lacs
Lac 1	A l'extérieur de la ville	Entouré de terrains non urbanisés dont certains cultivés avec des faibles doses d'engrais	Couvert de <i>nymphaea lotus</i> (nénuphars) à environ 70%
Lac 2	Bordure de l'enceinte présidentielle	Regorge des crocodiles	Totalement dégarni
Lacs 3 & 4	Quartier habitat, densément peuplé	Héberge une population de crocodiles. Soumis aux apports extérieurs issus des quartiers populaires.	Totalement dégarnis
Lac 5	Zone assez urbanisée dont l'hôpital de la ville.	Reçoit les eaux des lacs 4 ; 7 et 8.	Couvert de <i>nymphaea lotus</i> (95%)
Lac 6	En contrebas du lac 5.	Alentours peu urbanisés mais reçoit les eaux du lac 5.	Couvert de <i>pistia stratiotes</i> (salade d'eau)
Lac 7	Près du quartier Dioulabougou	Reçoit toutes les eaux usées de ce quartier.	Couvert totalement de <i>pistia stratiotes</i> (salade d'eau) à 100%.
Lac 8	Près du quartier habitat	En bordure d'une vingtaine de restaurants qui y déversent leurs eaux usées.	Couvert de <i>eichhornia crassipes</i> (jacinthes d'eau) et <i>nymphaea lotus</i>
Lacs 9 & 10	Zone moyennement urbanisée	De petites activités de jardinage	Couvert de <i>nymphaea lotus</i> et de <i>eichhornia crassipes</i>

Tableau.2.4 : Description de l'environnement des lacs11 à 18

Code	Localisation	Description
Lac11	Barrage de KOSSOU à 40 km de Yamoussoukro	Eau peu polluée, exempte de macrophytes, peu d'algues
Lac12	Retenue de YABRA à 20 km de Yamoussoukro	Entièrement recouvert de <i>pistia stratiotes</i> ; retenue à vocation agricole.
Lac13 ; 14 ; 15 ; 16	Situés dans la ville de Yamoussoukro	Recouverts généralement de <i>pistia stratiotes</i> , de macrophytes flottants, de jacinthes, de lotus, algues...
Lac17	Retenue de KOUNGOLO à 20 km de Yamoussoukro	Zone rurale, peu de culture proches ; lac sans macrophytes
Lac18	Retenue sur la route de SINFRA, zone rurale.	Entièrement recouvert de <i>pistia stratiotes</i> .

II.2 CONDITIONS DE PRÉLÈVEMENT

Les prélèvements ont eu lieu chaque matin de 8h à 10 h. 21 points de prélèvements ont été choisis généralement à l'entrée et à la sortie de chaque lac. La moyenne des points dans un même lac donne une assez bonne représentation des eaux du lac considéré. A chaque point, un litre d'eau est prélevé, à 50cm de profondeur, à l'aide d'une bouteille en polyéthylène fixée sur une perche long de 5m. Après les analyses in situ les échantillons sont conservés dans l'obscurité et au froid dans une glacière.

.../...

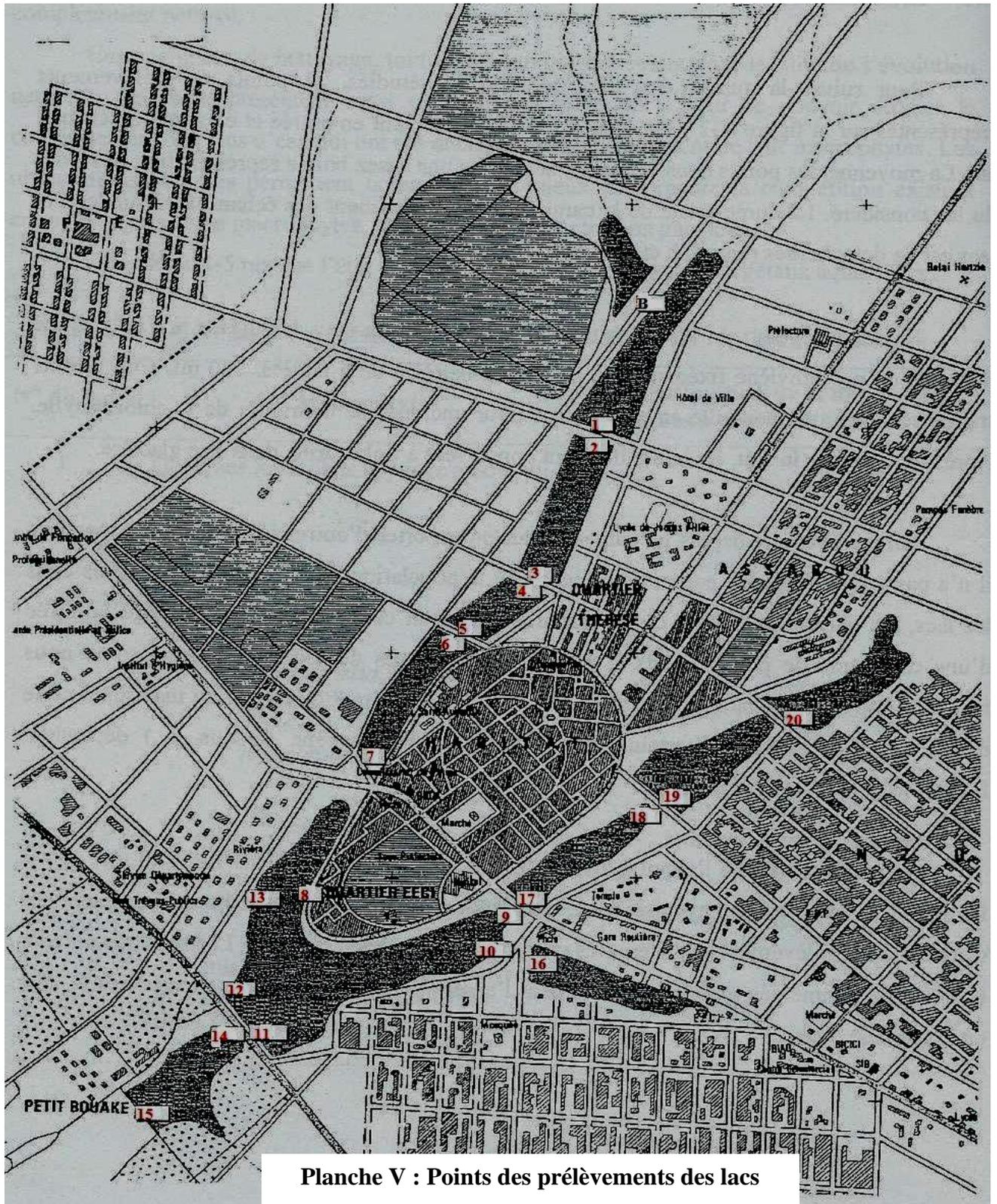


Planche V : Points des prélèvements des lacs

Source : (Lhote, 2000)

II.3 MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les méthodes utilisées sont les méthodes standard des normes AFNOR et ISO. Le matériel utilisé est le matériel usuel de laboratoire.

Le tableau 2.5 résume les analyses réalisées et les méthodes employées sur chaque échantillon.

Tableau 2.5a : Analyses et traitement des données

Paramètres	Unités	Normes	Méthodes et matériels de mesure
Température	°C	ISO 5814	<i>Sonde de température couplée à l'oxymètre WTW OXI320</i>
pH		NFT90-008	<i>Mesure électrométrique avec électrode de verre. ph-mètre WTWpH90.</i>
Conductivité	µS/cm	NFT90-031	<i>Microprocesseur conductivity/TDS meter HI 9835 HANNA.</i>
Potentiel redox	mV	NFT90-008	<i>Millivoltmètre WTWpH90 équipé d'une électrode combinée redox Melter Toledo Pt 4808-S7 au chlorure d'argent.</i>
Oxygène dissous	mg d'O ₂ / L	ISO 5814	<i>Méthode potentiométrique à l'aide de l'oxymètre WTW OXI 320</i>
Turbidité	NTU	NFT 90-105	<i>Comparaison de la lumière diffusée et de la lumière transmise par l'échantillon d'eau. Turbidimètre portable modèle 966 Orbeco-Hellige</i>
Matière en suspension	m/L	NFT90-023	<i>Filtration de 250 mL de l'échantillon sur membrane en fibre de verre (0.45µm), séchage à l'étuve et pesée.</i>
Orthophosphates	mg de P/L	NFT 90-023	<i>Minéralisation de l'échantillon à chaud en présence d'acide sulfurique et de persulfate de sodium, puis dosage spectrométrique des phosphates obtenus (Kontron UVIKON 810)</i>

Tableau 2.5b : Analyses et traitement des données (suite)

Paramètres	Unités	Normes	Méthodes et matériels de mesure
Nitrates	mg de N/L	NFT 90-045	<i>Formation d'un composé jaune issu de la réaction des nitrates avec l'acide sulfosalicylique, après traitement à l'alcali. Dosage spectrométrique de la coloration obtenue (Kontron UVIKON 810)</i>
Azote ammoniacal	mg de NH ₄ ⁺ /L	NFT 90-015	<i>Formation en milieu alcalin d'un composé de type indophénol, et mesure spectrométrique à 630 nm (Kontron UVIKON 810)</i>
Indice de permanganate	mg d'O ₂ /L	NFT 90-050	<i>Oxydation de l'échantillon à chaud en milieu acide puis dosage en retour. Mesuré sur l'eau brute.</i>
Titre Hydrotimétrique	mg/L	NFT 90-005	<i>Dosage à l'acide EDTA en milieu basique (pH=10) et ajout du noir ériochrome T.</i>
Calcium et magnésium	mg/L	NFT 90-005	<i>Dosage à l'acide EDTA en milieu basique (pH=10) et ajout du noir ériochrome T.</i>
Sodium et potassium	mg/L	NFT 90-019	<i>Dosage par spectrométrie de flamme (modèle 410).</i>
Titre Alcalimétrique Complet	még/L		<i>Dosage à l'acide en présence d'hélianthine jusqu'au virage du rouge au jaune orangé.</i>
Ions chlorures	mg/L		<i>Dosage au sulfate d'argent jusqu'au virage au jaune.</i>

Certains paramètres du tableau (température, pH, la conductivité, la ddp et l'oxygène dissous) ont été mesurés in situ. Les autres l'ont été au laboratoire le jour du prélèvement ou au plus tard le lendemain. Les échantillons sont conservés non seulement dans une glacière du lieu de prélèvement au laboratoire d'analyse mais aussi dans une chambre froide (5°C).

Lorsque l'échantillon devrait être analysé le lendemain, il est acidifié et conservé dans une chambre froide. Sur chaque échantillon est effectuée une mesure de 18 paramètres.

II.4 ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES 10 LACS

II.4.1 EVOLUTION SPATIALE DES PARAMETRES ANALYTIQUES

II.4.1.1 Température (T)

Pour chaque lac envahi par les macrophytes, la moyenne des températures est environ de 27°C en début de matinée. Cette valeur élevée de la température, caractéristique des milieux tropicaux, joue un rôle fondamental sur la cinétique des réactions biologiques et physico-chimiques, ainsi que sur la valeur de la constante d'équilibre de ces réactions. La disponibilité de la lumière joue un rôle fondamental sur la production primaire. Quand les autres conditions sont optimales, l'intensité de la photosynthèse est directement proportionnelle à l'intensité lumineuse [63].

La forte luminosité reçue par certains d'entre eux, totalement dégarnis et entièrement exposés aux rayons solaires, élève leur température par rapport aux autres lacs.

La présence de macrophytes (qui constituent une couverture de la surface des lacs) a pour conséquence directe, une nette diminution de la température des eaux qu'ils recouvrent c'est le cas des lacs 5 ; 7 ; 8 ; 9 et 10 comme le montre la figure 2.1.

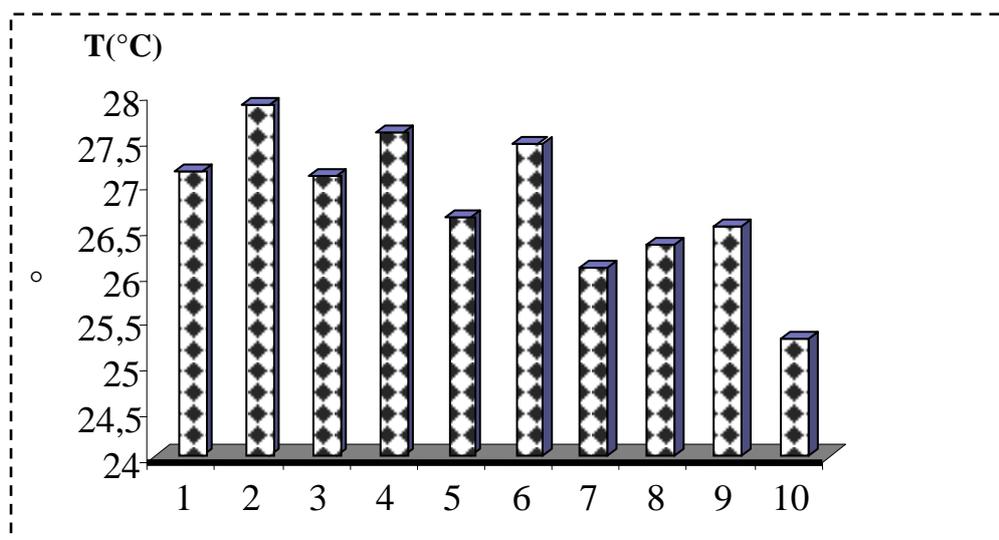


Figure 2.1: Température des différents lacs

II.4.1.2 Potentiel d'hydrogène (pH)

La figure 2.2 présente le pH des lacs analysés dans les mêmes conditions. Généralement le paramètre pH dépend essentiellement de l'environnement du lac en particulier la nature géologique des terrains traversés par les eaux, les apports extérieurs, les réactions physico-chimiques et biologiques qui ont lieu dans le milieu [47].

Dans cette étude, la nature géologique du milieu étant identique pour tous les lacs, seuls les apports extérieurs, les réactions physico-chimiques et biologiques pourront expliquer les variations de pH. Il convient toutefois de noter que les réactions physico-chimiques et biologiques sont en grande partie induites par les apports extérieurs.

Cette figure montre que les lacs couverts de macrophytes ont un pH moins élevé. Cela est sans doute dû au relargage d'acide organique par les racines des macrophytes ; ce qui entraîne une baisse du pH [24].

Les lacs 3 et 4 dont les pH demeurent les plus élevés sont débarrassés de toutes sortes de végétaux et renferment en moyenne une quarantaine de crocodiles. Les apports extérieurs en nutriments de ces reptiles, les déchets rejetés par ces derniers seraient à la base de cette sensible démarcation. L'effet des rayons solaires influent également sur la variation du pH.

Du point de vue industriel, le pH intervient dans la protection de l'acier dans un système de chaufferie. Les techniques pour lutter contre la corrosion varient selon le type de corrosion rencontré. L'une des principales méthodes est le maintien d'un pH adéquat (10-12) dans l'eau d'alimentation.

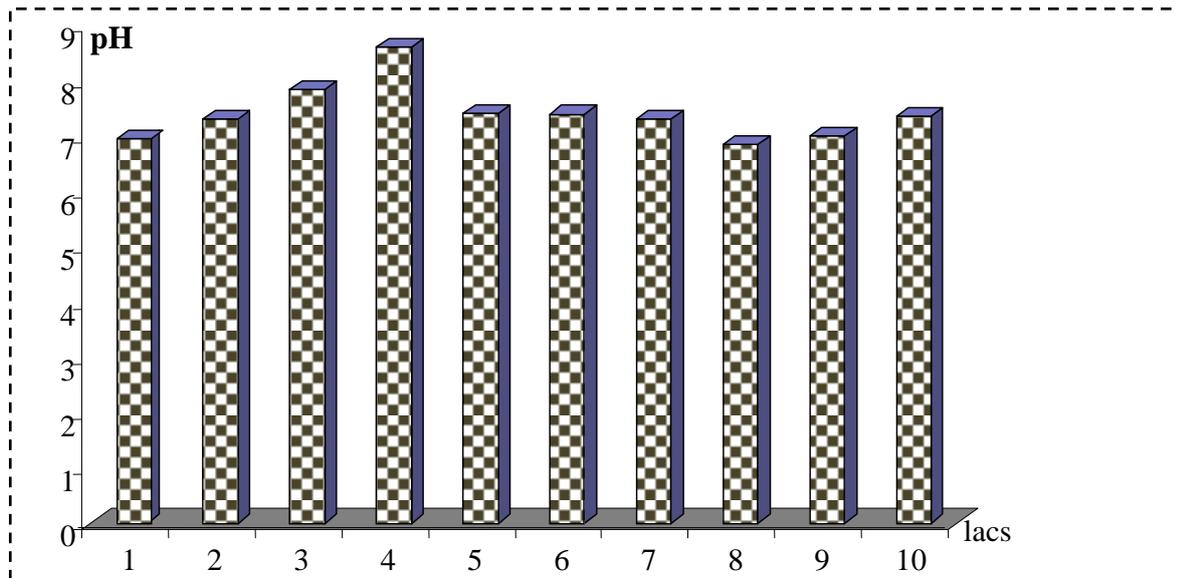


Figure 2.2: Potentiel d'Hydrogène (pH) des différents lacs

II.4.1.3 Indice de permanganate (IP)

La mesure de l'oxydabilité (IP) a été faite sur l'eau brute (figure 2.3). Ce paramètre nous informe sur la quantité de matière organique contenue dans chaque lac. Les lacs 3 ; 4 ; 5 et 6 ont un indice de permanganate autour de cinq (5) mg d'O₂ /L, alors que le lac 7 apparaît comme le lac qui détient le plus de matière organique (9.57mgO₂/L).

Les autres lacs, avec un indice en dessous 5mg/L, présentent une oxydabilité relativement faible. On pourrait expliquer le taux assez élevé du lac 7 par sa position particulière par rapport aux quartiers populaires qui y déversent toutes les eaux usées, de ruissellement et par endroit, des déchets ménagers. On observe également qu'au moment de l'analyse le lac 7 est le seul lac majoritairement couvert de salade d'eau.

La décomposition des racines des végétaux est une cause essentielle dans l'augmentation de l'indice de permanganate. L'oxydabilité des eaux est notamment causée par la décomposition de la végétation sur le milieu aquatique et les diverses matières organiques issues des rejets urbains [62]. Ces matières organiques se décomposent pour former des acides organiques. Cet acide organique est à l'origine d'un faible pH de l'eau d'alimentation qui provoque l'attaque des conduites des chaudières ; la prolifération de diatomées, de moisissures, de films biologiques et de bactéries manganiques ou ferriques. Les particules suspendues se rassemblent à la surface de l'eau de la chaudière et rendent difficile la libération des bulles de vapeur remontant à la surface.

L'encrassement biologique a lieu surtout dans les circuits de refroidissement et d'eaux potables. Dans les circuits de refroidissement, les microorganismes susceptibles de se développer sont les algues, les bactéries et les champignons [17].

Ces microorganismes sont généralement présents à l'état latent et ne gênent pas le fonctionnement du circuit. Mais si des conditions favorables se présentent, ils se développent et forment des dépôts provoquant ainsi l'encrassement. Ces dépôts favorisent la corrosion par aération différentielle. Un film d'une épaisseur de 55µm, réduit de 20% le rendement d'une centrale [18].

.../...

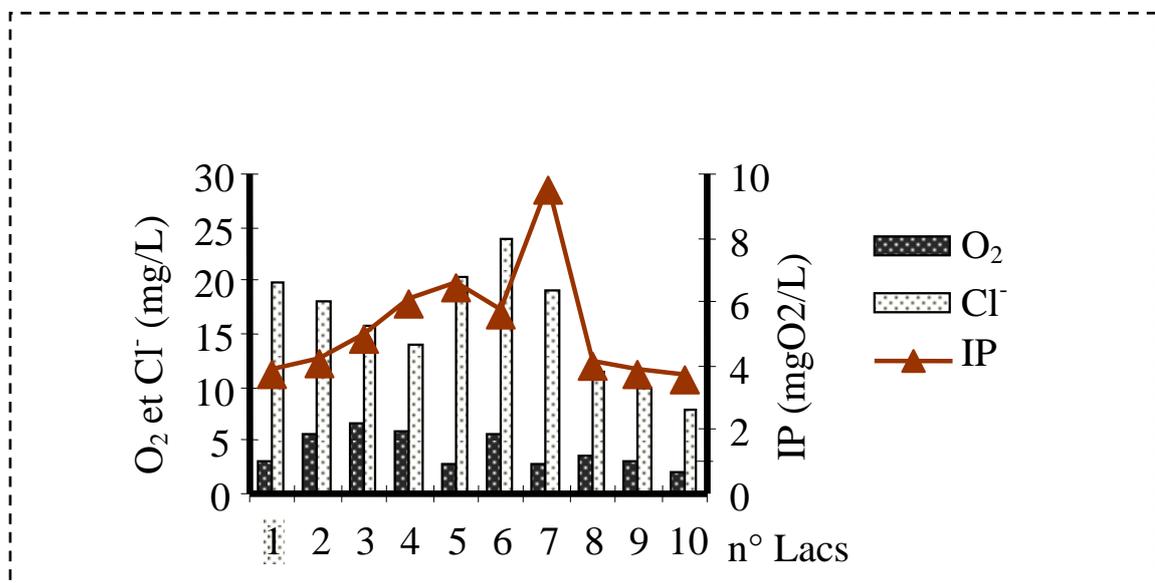


Figure 2.3: Evolution de l'oxygène dissous, de l'IP et des ions chlorures

I.4.1.4. Teneur en oxygène dissous

L'observation de la figure 2.3 fait ressortir une teneur élevée en oxygène dissous dans les lacs 2 ; 3 ; 4 ; 6. Les lacs 2 ; 3 et 4 n'étant pas sont couverts de végétaux, il se crée donc un contact direct entre la surface libre de l'eau et la couche atmosphérique favorisant ainsi la dissolution de l'oxygène atmosphérique dans ces eaux. Aussi, les phénomènes photosynthétiques qui ont lieu au niveau des autres lacs (respiration des végétaux qui couvrent l'eau) sont-ils à la base des variations des teneurs en oxygène dissous.

La dégradation de la matière organique des végétaux consomme également l'oxygène du milieu pour rendre possible l'activité des bactéries aérobies. La valeur du taux d'oxygène dissout dépend fortement de l'heure du prélèvement.

Les variations montrent qu'il faut être prudent avant d'interpréter les paramètres, et ne comparer que des mesures réalisées à la même heure.

En chaufferie industrielle, l'oxygène est l'un des paramètres dont le contrôle est nécessaire pour la protection de l'acier. L'oxygène provoque la corrosion notamment par piqûre des tubes de la chaudière. Ce qui a pour conséquences immédiates le piquage de la tuyauterie, la rupture dans les circuits de vapeur etc.

L'une des principales méthodes de protection de la chaufferie est le contrôle de l'oxygène.

II.4.1.5 Conductivité des lacs (Cond.)

La conductivité est globalement plus élevée dans les lacs 5 ; 6 et 7 et l'est moins dans les lacs 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 9 et 10 (figure 2.4). L'influence des rejets urbains, riches en sels minéraux, explique la conductivité élevée des lacs 5 ; 6 et 7 situés au centre ville excepté le lac 6, situé au sud-ouest de la ville, et qui reçoit les eaux des autres lacs. Toutefois, l'état de faible minéralisation des autres lacs (1, 2, 3 et 4) serait dû au fait qu'ils soient situés dans des zones faiblement urbanisées. Par ailleurs la minéralisation des lacs 8 et 9 pourrait être due à leur localisation et à la présence de macrophytes. La conductivité du lac 10 est surtout justifiée par la densité de la population de macrophytes à sa surface et le faible taux de rejets urbains qu'il reçoit.

La conductivité moyenne de ces eaux est de $210\mu\text{S}/\text{cm}$; ce qui témoigne d'une faible minéralisation de l'ensemble des lacs.

La conductivité est un paramètre suivi de très près dans la conduite des installations de chaufferies car elle témoigne du niveau de minéralisation de l'eau d'alimentation. Une faible conductivité signifie une faible minéralisation de l'eau.

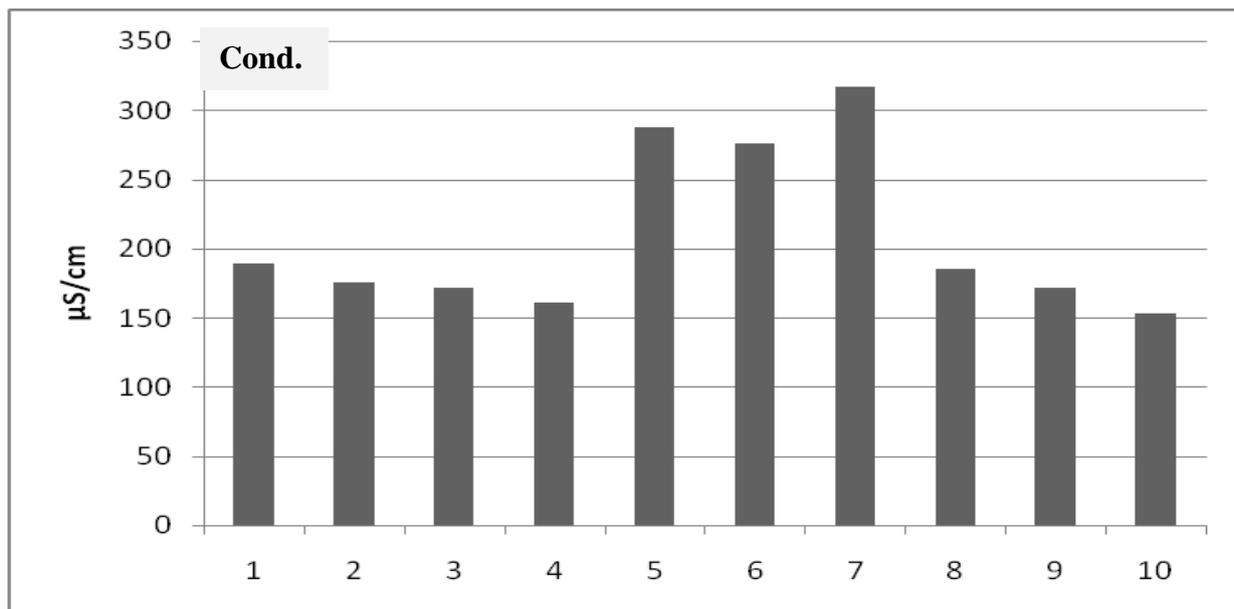


Figure 2.4: Conductivité des différents lacs

II.4.1.6 Titre hydrotimétrique (TH)

La figure 2.5 présente les concentrations des lacs en calcium et en magnésium (Titre Hydrotimétrique). Les lacs 4 ; 5 ; 6 et 7 ont des teneurs assez élevées en calcium et en magnésium. Cependant le lac 4 n'est pas couvert comme les autres lacs 5 ; 6 et 7. Cette différence de teneurs est due à l'état trophique des lacs, à l'importance des rejets urbains que reçoivent ces lacs. D'autre part, le lac 4 reçoit sa charge en calcium et magnésium des établissements publics en amont dont le système d'épuration des eaux usées est défaillant.

La dureté calcique et magnésique est à l'origine des dépôts de calcaires dans la chaudière, de la réduction de l'efficacité et du transfert thermique. Dans les cas graves, elle peut mener à la brûlure ou à la rupture des tuyaux de la chaudière. Les formes de dépôts sont dans l'ordre, des bicarbonates, des sulfates, des chlorures et des nitrates. Certains sels de calcium sont réversiblement solubles. Le magnésium réagit avec les carbonates pour former des composés à faible solubilité selon la réaction suivante :



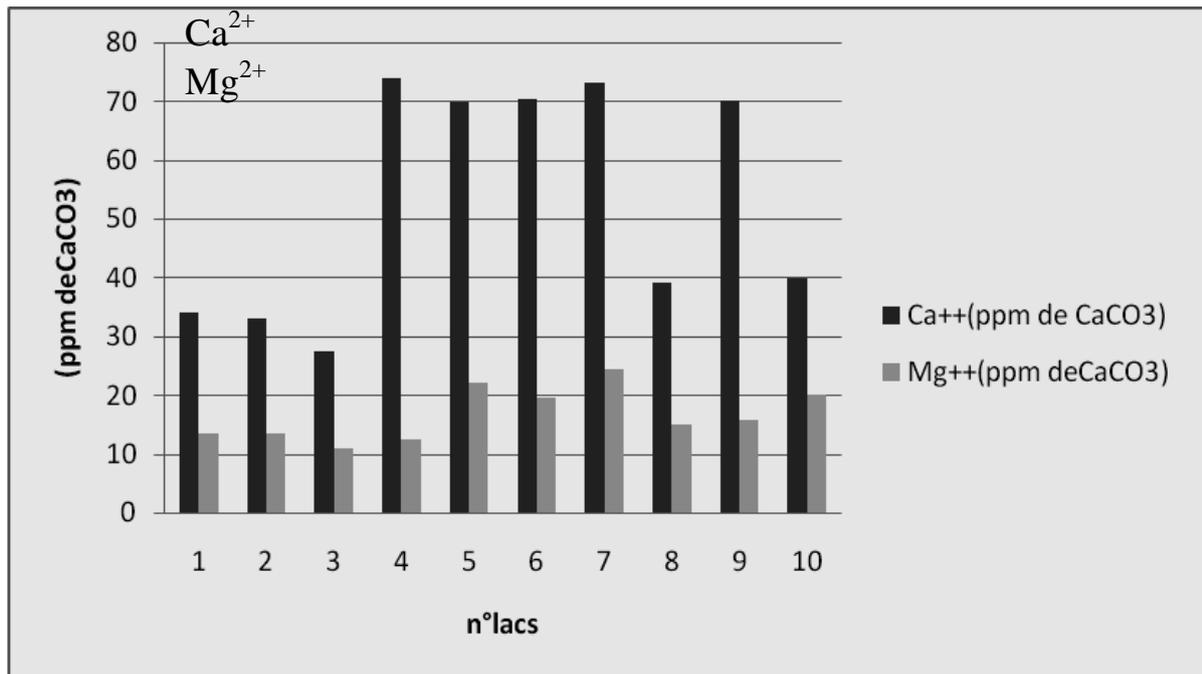


Figure 2.5 : Dureté calcique et magnésique des différents lacs

II.4.1.7 Titre alcalimétrique complet (TAC)

Les apports extérieurs, responsables de la minéralisation des lacs, ont les mêmes influences sur tous les sels dissous contenus dans les lacs. Les ions HCO_3^- ont tendance à établir un équilibre ionique dans les lacs avec les ions de charges positives. Le besoin de maintien de cet équilibre ionique dans chacun des lacs justifie la similitude entre les évolutions du TH (Figure.2.5) et du TAC (figure.2.6).

L'alcalinité de l'eau d'alimentation est à la base du moussage, et de la formation des acides carboniques dans la vapeur qui causent notamment la corrosion du séparateur d'eau de condensation et une fragilisation du système. Les ions HCO_3^- , OH^- et CO_3^{2-} réagissent avec les sels de sodium pour former des composés comme le NaOH, le NaHCO_3 et le Na_2CO_3 qui sont responsables d'une forme de corrosion appelée fragilisation.

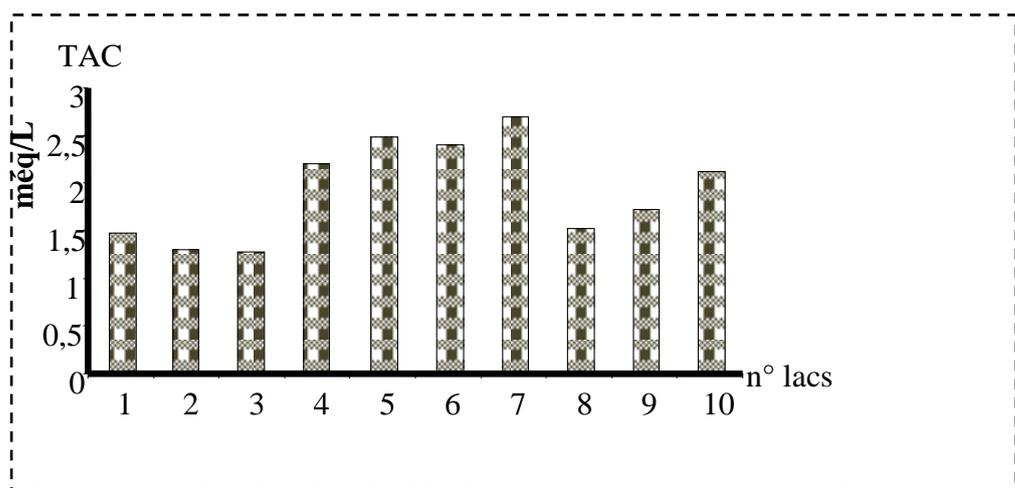


Figure 2.6 : Titre Alcalimétrique Complet (TAC) des différents lacs

II.4.1.8 Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) sont le plus souvent vecteurs de polluants comme les métaux lourds, les polluants organiques, les micro-organismes pathogènes et les nutriments tels que le phosphore. Si les MES sont qualifiées d'organiques (algues), il faut néanmoins souligner que des quantités importantes de particules minérales sont lessivées en saison pluvieuse. Les positions en amont des lacs 1 ; 9 et 10 pourraient expliquer leur faible taux en MES. Les autres lacs qui reçoivent presque toutes les eaux de ruissellement issues des quartiers populaires ont fortement augmenté leurs teneurs en MES. (Figure 2.7). L'apport des matières organiques dû à la décomposition des racines et des feuilles des macrophytes est aussi l'un des facteurs de charge en MES.

Les matières en suspension sont responsables du primage, du moussage et des dépôts qui peuvent colmater les canalisations et causer la corrosion. Les MES se trouvent principalement dans l'eau de surface, causé par, notamment, la décomposition de la végétation. Les matières organiques se décomposent pour former des acides organiques. Le résultat est un pH d'eau d'alimentation faible, qui provoque l'attaque des conduites des chaudières. Il inclut les diatomes, les moisissures, les films biologiques, les bactéries manganiques/ferrique. Les particules suspendues se rassemblent à la surface de l'eau de la chaudière et rendent difficile la libération des bulles de vapeur remontant à la surface. Le moussage peut aussi être attribué à l'eau contenant des carbonates en solution dans laquelle un léger précipité flocculeux sera formé à la surface de l'eau.

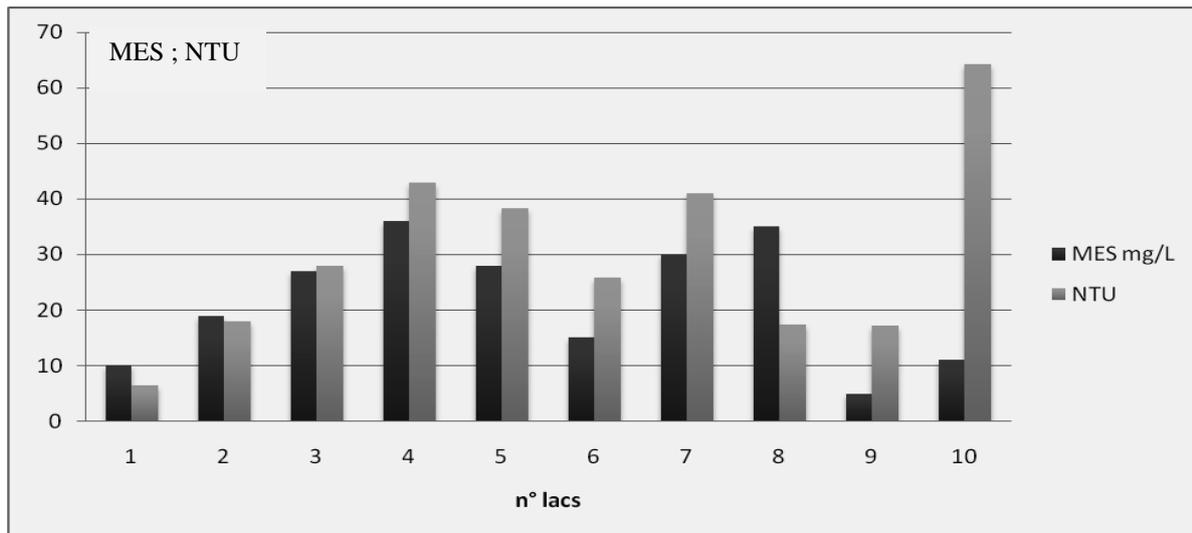


Figure 2.7 : Turbidité(NTU) et matières en suspension(MES) des différents lacs

II.4.1.9 Concentration en ions chlorures et en sulfates

En présence de sodium, de calcium et de magnésium, les sulfates provoquent un entartrage important des conduites par la formation du Na_2SO_4 , du CaSO_4 et du MgSO_4 . La proportion n'est pas assez élevée dans les lacs étudiés. Mais cette teneur est largement suffisante pour provoquer cet entartrage. Le lac 7 reste le plus chargé en sulfates.

La figure 2.9 présente également les concentrations des lacs en ions chlorures. Les lacs 8, 9 et 10 sont les moins concentrés en ions chlorures ($<25\text{mg/L}$), mais ce taux est susceptible de causer des dommages à la chaudière.

La présence des ions chlorures provoque la formation du chlorure de calcium et du chlorure de magnésium qui sont corrosifs. En effet, les ions chlorures sont également à l'origine des primages (entraînés par la vapeur d'eau et de sels dissous), provoquent des dépôts de sels dans les surchauffeurs et les turbines. Si le taux des ions Cl^- est assez grand, on observe aussi le phénomène de moussage. Le primage est causé par la concentration en carbonate de sodium, sulfate de sodium ou chlorure de sodium en solution. Les ions chlorures sont également responsables de la corrosion par piqûre.

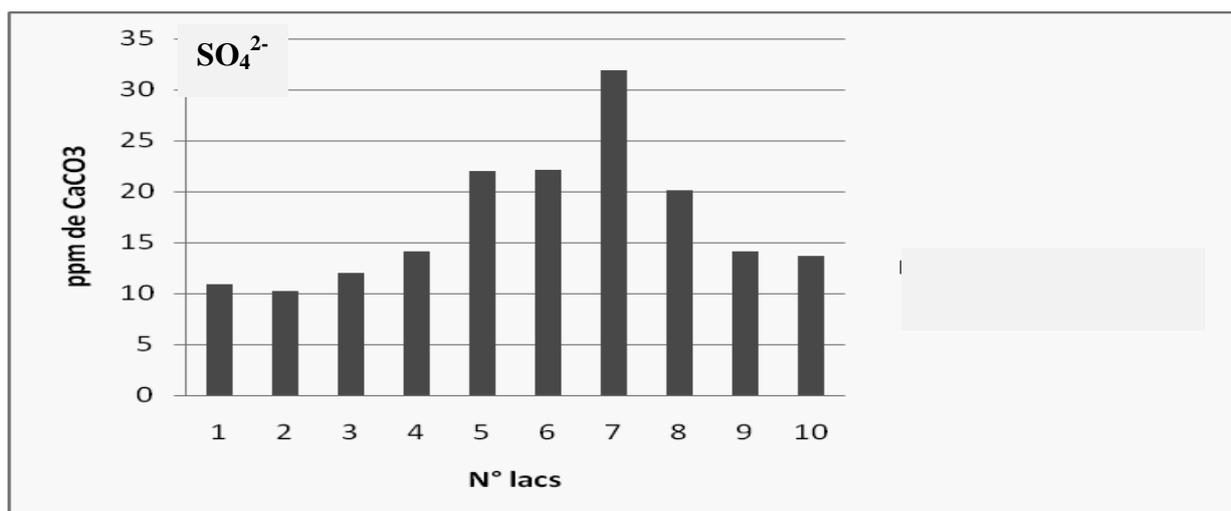


Figure 2.8: Concentrations en ions sulfates des différents lacs

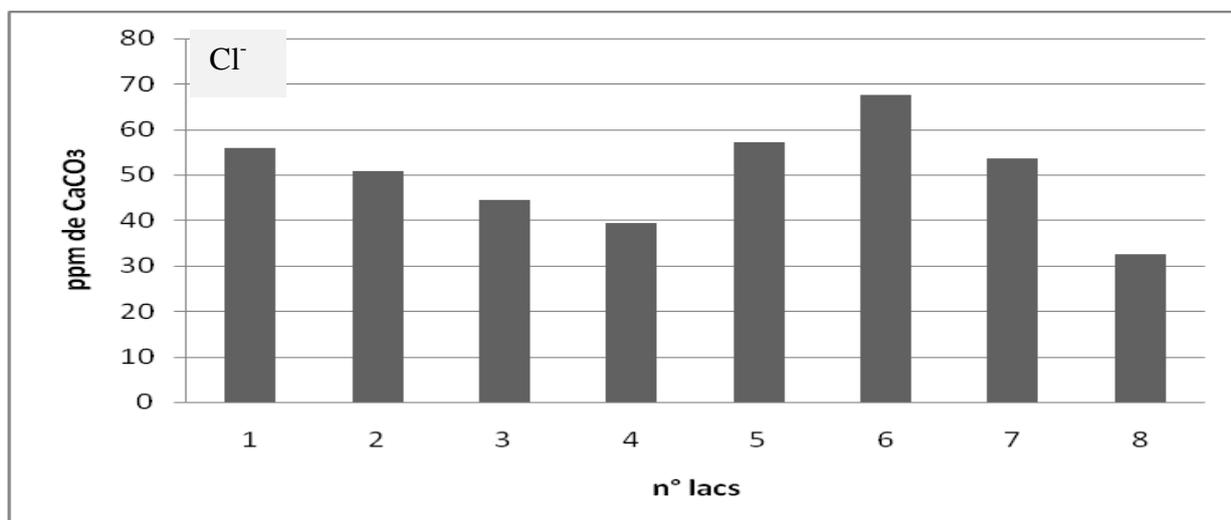


Figure 2.9: Concentration en ions chlorures des différents lacs

II.4.1.10 Teneur en Azote (azote ammoniacal et nitrates)

L'azote ammoniacal et les nitrates sont les deux principales formes biodisponibles de l'azote. Les figures 2.10 et 2.11 présentent des taux relativement faibles dans tous les lacs sauf dans le lac 7 et dans une certaine mesure le lac 10 en ce qui concerne les nitrates. Les lacs 7 et 10 ont des teneurs relativement plus faibles que les autres lacs en teneur en oxygène (environ 2 mg d'O₂/L). Il est démontré qu'aux environs de ces proportions en oxygène, la matière organique est détruite par les bactéries anaérobies, qui transforment l'azote organique

en azote ammoniacal [30]. L'environnement urbain des lacs a également une influence sur leur teneur en azote ammoniacal.

Concernant les nitrates, les faibles concentrations dans les pays tropicaux s'expliquent par le fait que la dénitrification bactérienne est favorisée aux températures élevées [47].

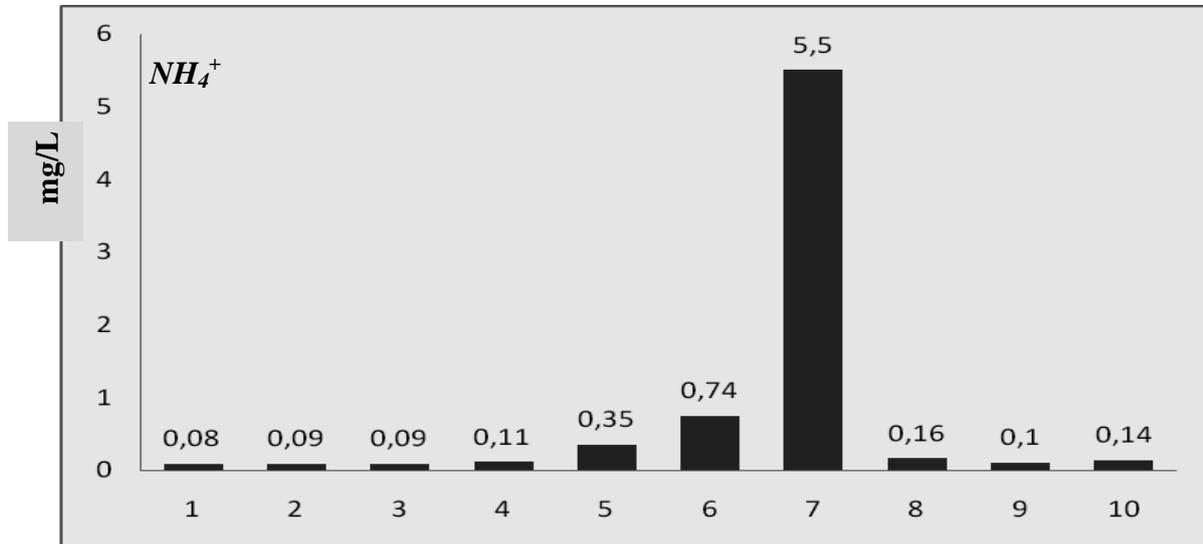


Figure 2.10: Concentration en azote ammoniacal des différents lacs

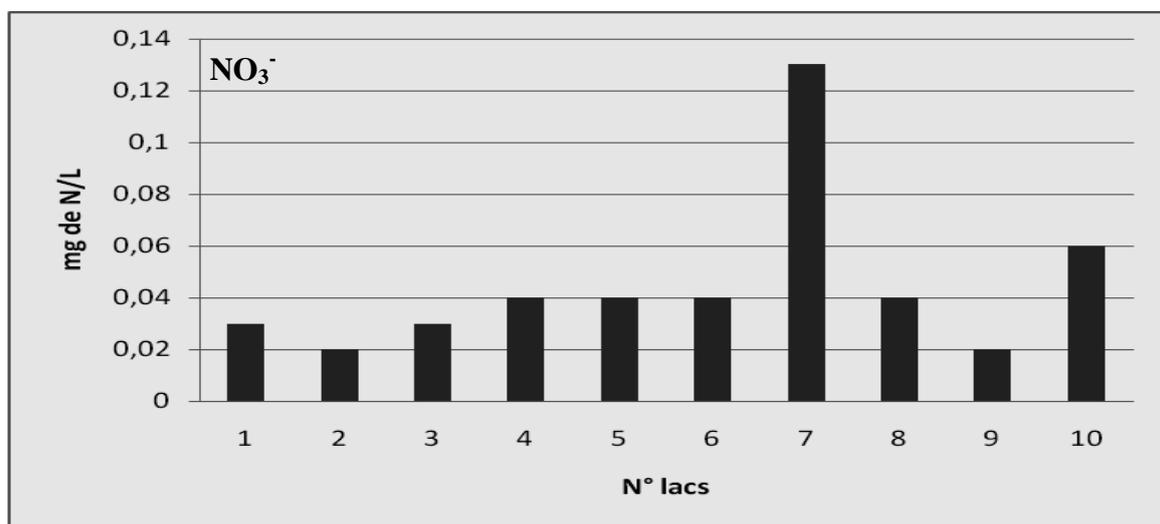


Figure 2.11: Concentrations en ions nitrates des différents lacs

II.4.1.11 Concentration en ions phosphates

La figure 2.12 présente la distribution de la concentration en phosphates dans les lacs. On sait que la concentration en phosphore dans les eaux joue un rôle déterminant sur le développement des végétaux aquatiques (OCDE, 1982). Les teneurs en phosphates des lacs de la ville de Yamoussoukro sont sensiblement faibles et l'écart entre elles est considérable.

Cette variabilité pourrait être due à l'apport extérieur. Les phosphates les plus élevés sont celles des lacs 7 et 10 qui sont entièrement couverts par des végétaux aquatiques (pistia, lotus et divers). En effet la décomposition des macrophytes enrichit le milieu par une minéralisation du phosphore organique. Les lacs à forte biomasse phytoplanctonique sont caractérisés par un niveau de phosphore généralement faible [61]. Il est donc certain que le taux de phosphate de ce système dépend de la nature de la biomasse.

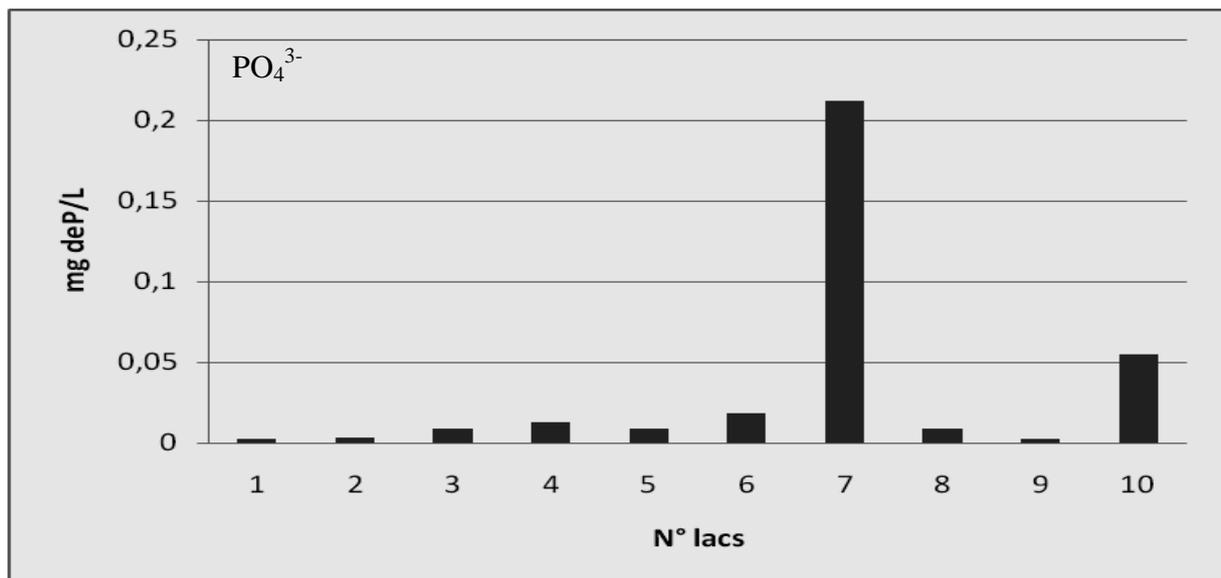


Figure 2.12: Ions Phosphates des différents lacs

II.4.1.12 Variation du pH, de l'oxygène et de la température dans le lac 5 au cours d'une journée

La protection de l'acier dans un système de chaufferie dépend de la température, du pH, et de la teneur en oxygène. De ce fait le contrôle de ces trois paramètres reste important dans la conduite d'une chaufferie industrielle. Les figures 2.13, 2.14 et 2.15 présente ici les évolutions journalières des trois paramètres à savoir la température, le pH et l'oxygène dissous.

Cette étude a été réalisée dans le mois de février (saison sèche), en un point fortement eutrophe du lac5. Le choix s'est porté sur le lac5 en raison de sa position carrefour et de son bassin versant élevé (21,9 km²). Entre 6 heures et 20 heures, des prélèvements ont été effectués suivis immédiatement des mesures de trois paramètres qui sont la température, l'oxygène et le pH.

Les trois courbes des figures 2.13 ; 2.14 et 2.15, caractéristiques de l'évolution du pH, de la teneur en oxygène et de la température, ont des allures semblables avec les maxima vers 16 heures.

La concentration en oxygène dissous est la résultante, d'une part de la consommation issue des activités respiratoires des organismes présents dans le milieu, et d'autre part de la production d'oxygène due aux rayons solaires par la réaction de photosynthèse et à l'oxygène de l'air atmosphérique. De même, l'activité photosynthétique des algues présentes dans le milieu entraîne une consommation du CO_2 dissous. Cet état de fait provoque une élévation du pH par déplacement de l'équilibre de l'acide carbonique. Cet aspect des variations journalières des paramètres est à souligner parce la teneur en oxygène reste un paramètre à contrôler dans la chaufferie industrielle. Quant au pH, son ajustement est à prendre en compte pendant les opérations de prétraitement (coagulation et floculation) et de traitement de l'eau.

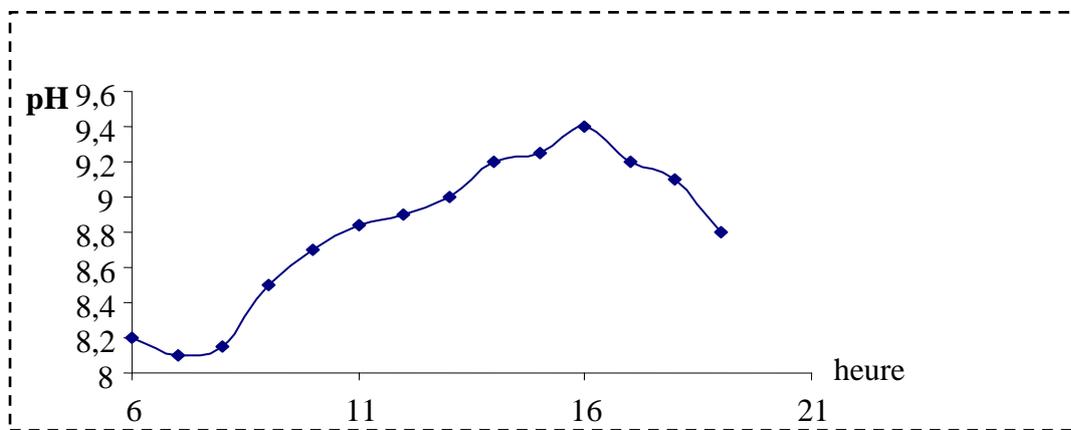


Figure 2.13: Evolution journalière du pH

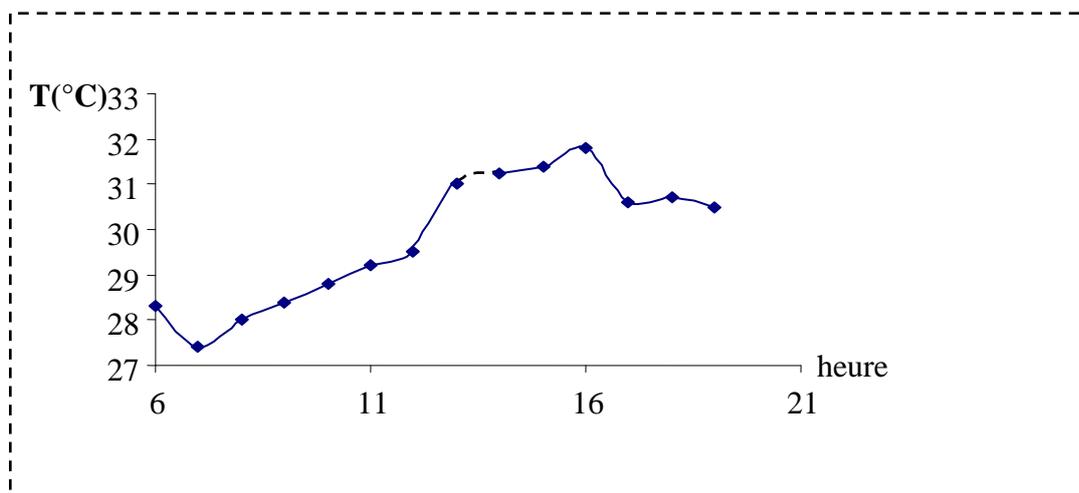


Figure 2.14: Evolution journalière de la température

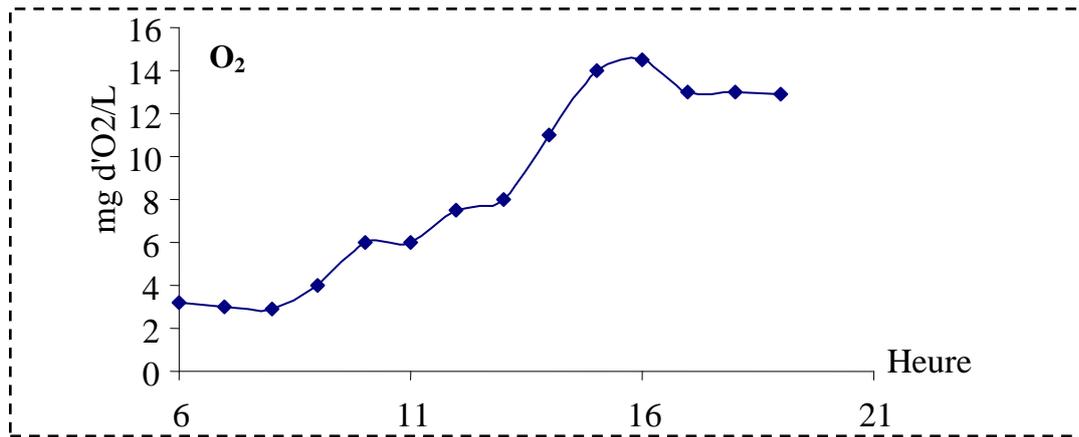


Figure 2.15: Evolution journalière de l'oxygène

II.4.2 EVOLUTION RELATIVE DES PARAMETRES SUR L'ENSEMBLE DES LACS

II.4.2.1 Matrice des coefficients de corrélation linéaire

La matrice des coefficients de corrélations linéaires (annexe 14) présente des valeurs majoritairement peu significatives sur l'ensemble des variables. Néanmoins on constate un certain nombre de corrélations entre des variables par affinité.

La majorité des corrélations fortes constatées ici dans la matrice concordent bien avec les résultats de la partie précédente conformément aux caractéristiques générales des eaux naturelles [62]. En effet les variables minérales, les sulfates, le calcium, le sodium et le potassium ont tous des corrélations significatives avec la conductivité. De même le sodium et le potassium ont une bonne liaison avec l'indice de permanganate (paramètre organique). Cette corrélation est à mettre dans le cadre des apports extérieurs qui contiennent du sodium et des substances organiques minérales.

Les sels minéraux concordent également entre eux ; ceci est justifié par l'équilibre ionique établi dans chaque lac [24]. Les plus fortes corrélations sont entre les variables sulfates et calcium (0.9822) et entre le sodium et le potassium (0.9688). Le cas des ions sulfates et du calcium peut s'expliquer par leur affinité, tandis que le calcium et le sodium dans les eaux naturelles sont généralement proportionnelles ce qui établit une linéarité au niveau de leur concentration.

Les autres corrélations entre les variables sont peu ou moyennement significatives. Cet état de fait peut être expliqué par le fait que l'évolution des paramètres dans leur majorité est influencée par l'environnement immédiat de chaque lac. Comme signaler au début, les

apports extérieurs, la densité des populations autour de chaque lac et la nature des déchets ou de rejets dans les lacs ont une part active sur la variété des paramètres de l'eau. Le TDS qui est le total des sels dissous concorde bien évidemment avec l'ensemble des sels minéraux (sodium, potassium, calcium, magnésium, sulfates, phosphates, nitrates, carbonates, azote ammoniacal...) des différents lacs.

II.4.3 VARIATION ANNUELLE DES PARAMETRES PHYSICO-CIMIQUES (LAC 1)

La valeur centrée réduite permet l'évaluation des anomalies de variation des paramètres sur une période donnée. Elle est calculée selon la formule suivante :

$$\tau = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (2.1)$$

Avec, X = variable, μ = espérance mathématique, σ = écart-type.

L'intervalle de confiance que nous considérons est $-5 < \tau < +5$ c'est-à-dire l'intervalle à l'intérieur duquel l'anomalie est supposée tolérable ou négligeable dans le contexte de notre étude. Au regard de cette hypothèse, on peut déduire des variations des courbes des (figures 2.16 ; 2.17 ; 2.18 ; 2.19) que les variables subissent de faibles évolutions durant l'année ou du moins l'effet de la pluviométrie est négligeable sur ces derniers.

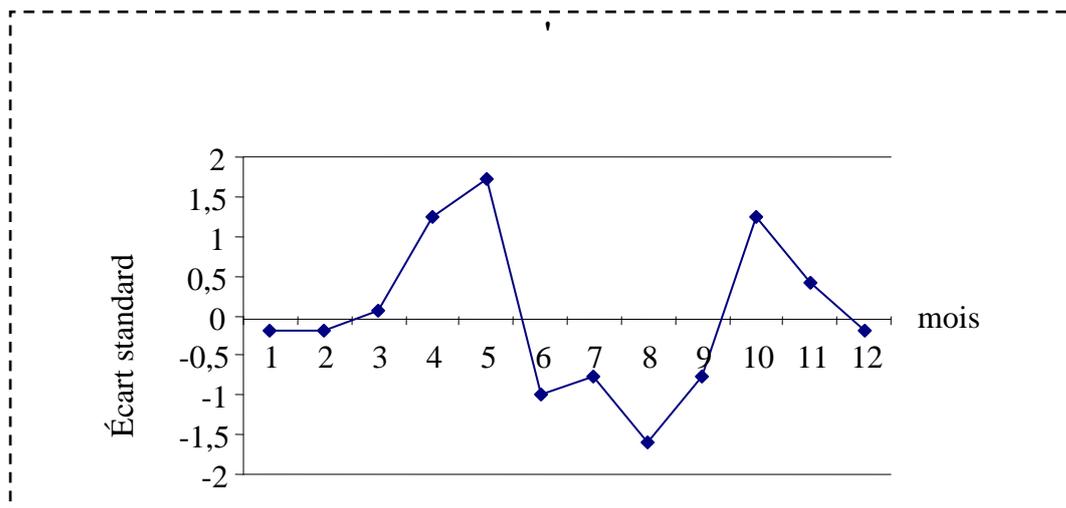


Figure 2.16 : Variation de l'écart standard de la température sur une année dans le lac 1

Dans un autre contexte, on pourrait considérer ces anomalies comme graves et non négligeables. Mais dans le cadre des traitements des eaux, on se met dans les conditions les

plus défavorables possibles, de sorte que ces écarts constatés soient pris en compte dans les calculs de dimensionnement.

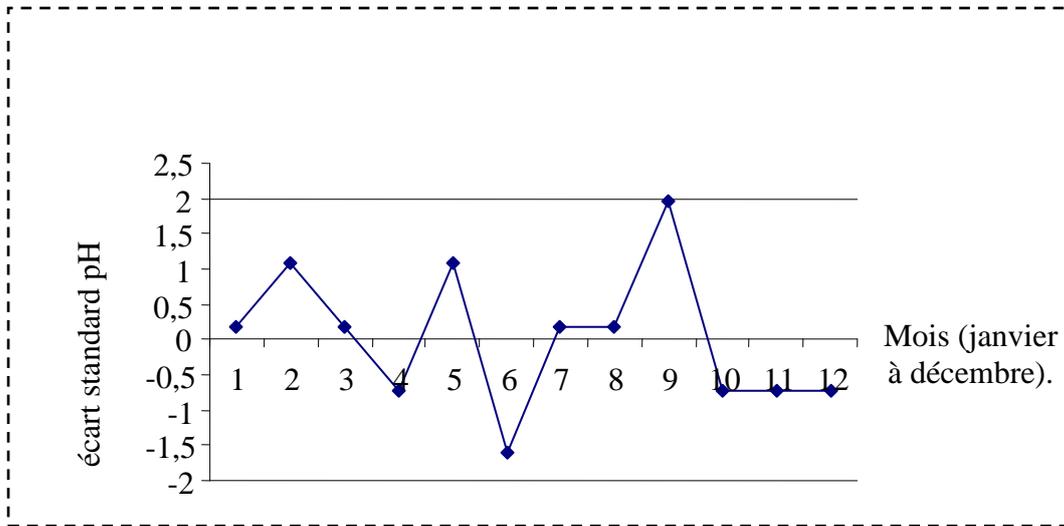


Figure 2.17 : Variation de l'écart standard du pH sur une année dans le lac1

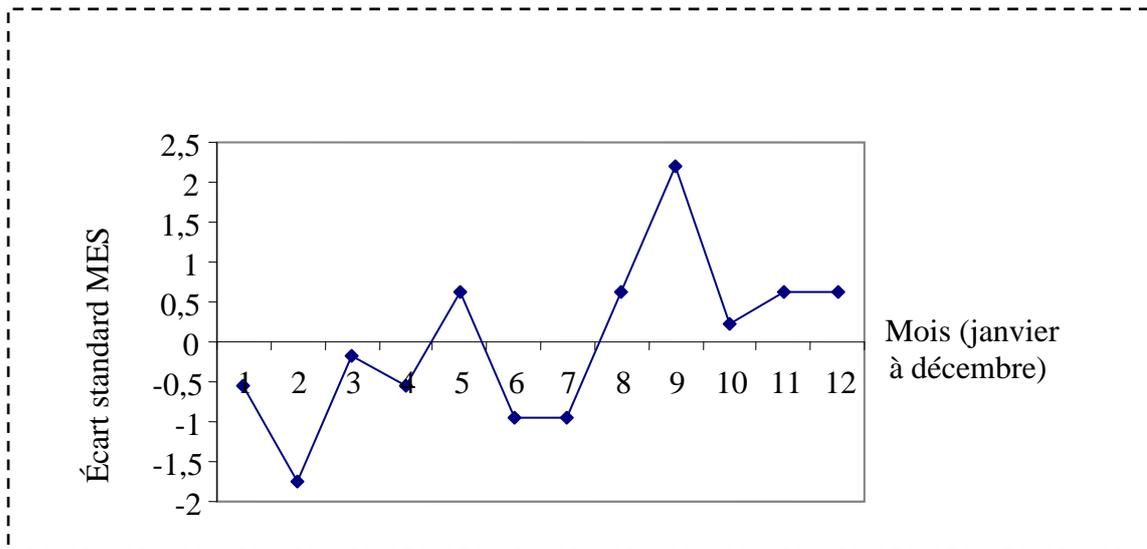


Figure 2.18 : Variation de l'écart standard des MES dans le lac1 sur une année

.../...

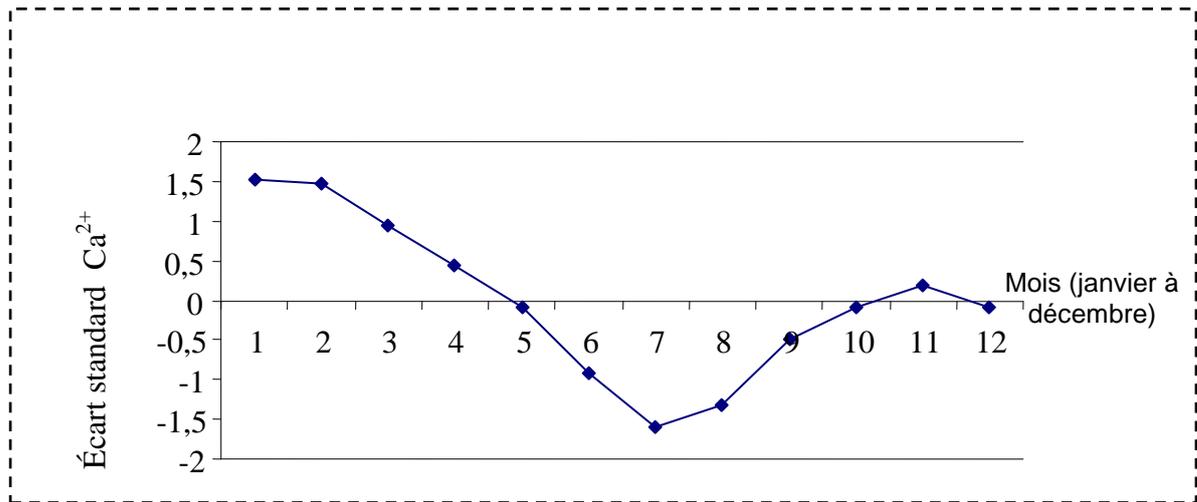


Fig2.19 : Variation de l'écart standard du calcium dans le lac1 sur une année

II.4.4 EXTENSION DES RESULTATS AUX LACS PERIPHERIQUES.

Au regard de la matrice des coefficients de corrélation linéaire entre les paramètres de l'étude, la conductivité concorde bien avec le total des sels dissous (TDS : $r = 0.9181$).

Pour faciliter la procédure de détermination des paramètres de déminéralisation des eaux des lacs périphériques, il est possible d'extrapoler les résultats. En ce qui concerne la déminéralisation des eaux, il est économique d'avoir une estimation, à partir d'un ou de deux paramètres, de la teneur totale des sels dissous dans chaque lac.

Avec des équations des corrélations entre les paramètres, il suffit de déterminer certains paramètres physico-chimiques ayant un coefficient de corrélation significatif (TAC, TH, conductivité...) pour calculer le TDS (Sels Total Dissous). Cette donnée intervient notamment dans le dimensionnement des résines ou dans le dosage de la chaux.

Il en est de même pour le titre en CO₂, qui ne se mesure pas directement mais qui se détermine par un abaque, et de la dose de chaux nécessaire qui se détermine par une longue procédure de calcul. On peut donc par exemple, au regard des figures : 2.20 et 2.21 déterminer respectivement le TDS en fonction du TH ou du TAC avec une marge d'erreur assez négligeable.

Les figures 2.20 et 2.21 présentent les évolutions des sels totaux dissous respectivement en fonction du titre hydrotimétrique et du titre alcalimétrique complet. Pour des coefficients de corrélation significatifs, les équations se présentent comme suit :

$$\text{TDS (mg/L)} = 150.92\text{TH (még/L)} + 59.318. \quad (r = 0.9158) \quad (2.2)$$

$$\text{TDS (mg/L)} = 130,5\text{TAC (m\acute{e}q/L)} + 18,87 \quad (r = 0,944) \quad (2.3)$$

L'évolution du titre dioxyde de carbone dans chaque lac en fonction de leur teneur en alcalimétrique [TCO₂ = f(TAC)] est également donnée par l'équation suivante :

$$\text{TCO}_2 \text{ (mg/L)} = -94.797(\text{TAC})^4 + 817.52(\text{TAC})^3 - 2581.2(\text{TAC})^2 + 3525.2\text{TAC} - 17441.2. \quad (2.4)$$

Avec TAC en m\acute{e}q/L

Avec un coefficient de corrélation $r = 0,93$. Il est plus aisé de calculer et avoir une idée du titre du CO₂, bien que cette équation soit longue, que de le déterminer graphiquement.

Les lacs de la région étant nombreux d'où le nom « politique » de région des Lacs, notre étude s'est étendue à huit autres lacs dont quatre sont situés à des kilomètres de la ville. C'est le cas du lac 11 à Kossou 40km, des lacs 12 et 17 situés à 20 km du centre ville.

D'autres lacs (13, 14, 15 et 16) situés en pleine ville ont également été l'objet d'étude. Les résultats d'analyse sont consignés dans le tableau 2.7

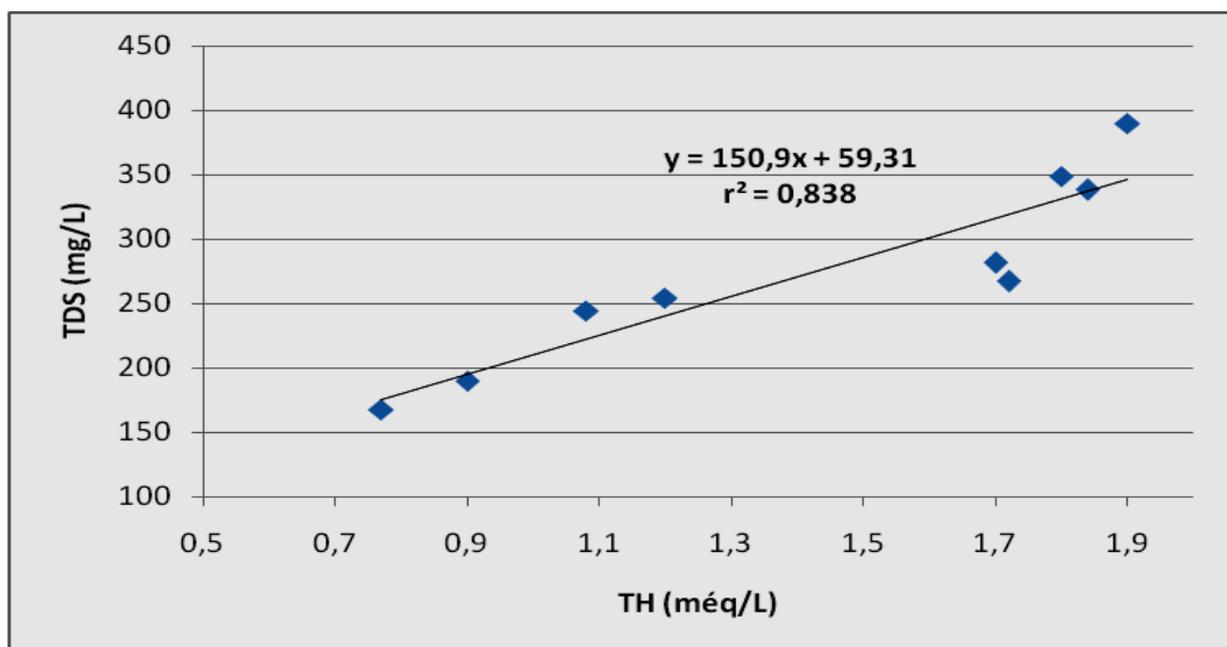


Figure 2.20 : Corrélation linéaire entre TDS et TH

.../...

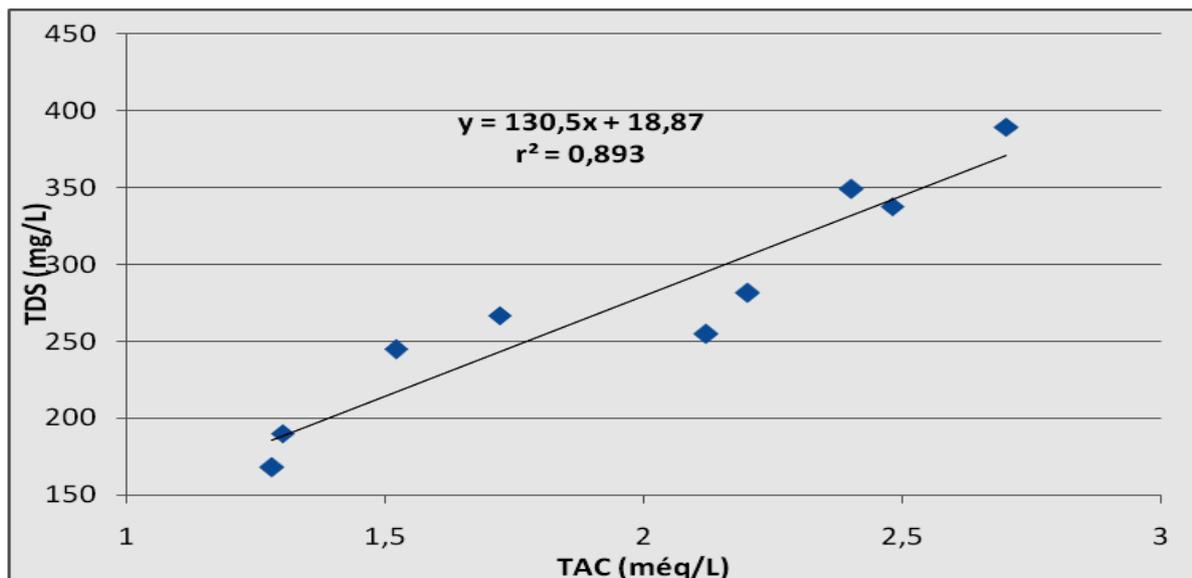


Figure 2.21 : Corrélation linéaire entre TDS et TAC

Lacs	11	12	13	14	15	16	17	18
Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	84	214	262	244	254	282	194	309
pH	7.16	6.54	7.56	7.45	6.54	6.4	7.1	6.7
IP (mg O ₂ /L)	2.12	11.45	6.37	8.56	6.55	10	6	9.2
ddp (mV)	440	377	372	332	126	400	425	277
Absorbance à 254 nm	0.062	0.5	0.17	0.296	0.36	0.553	0.222	0.408

Tableau 2.6 : Paramètres physico-chimiques des lacs 11 à 18

II.5 CONCLUSION PARTIELLE

L'analyse des paramètres physico-chimiques des différents lacs nous montre que les lacs de la ville de Yamoussoukro, objet de notre étude, sont relativement pollués, faiblement minéralisés (cond. = 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$). L'environnement des lacs a une influence significative sur la teneur des eaux. Il a été démontré que la pluviométrie ne modifie pas considérablement la concentration des paramètres. Aussi faut-il noter que les sels dissous ont des fortes corrélations entre eux.

Les teneurs en sels dissous, en matière organique, en matières en suspension, en oxygène et le pH sont de nature à provoquer des dommages considérables en cas d'utilisation directe des eaux des lacs dans une installation de chaufferie industrielle.

CHAPITRE III :

PROPOSITIONS DE TRAITEMENT DES EAUX DES LACS

INTRODUCTION

III.1 PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DES CHAUDIÈRES

III.2 PROPOSITION DE TRAITEMENT

III.3 CONCLUSION PARTIELLE

INTRODUCTION

L'analyse des paramètres physico-chimiques des différents lacs montre que les eaux sont largement chargées. Les paramètres analysés sont, pour la plupart, au dessus de la normale. D'une manière générale les eaux utilisées dans les systèmes de chauffage ne sont pas autant chargées. Les différentes unités de production de vapeur que nous avons visitées utilisent, pour certaines, de l'eau souterraine et pour d'autres, de l'eau commerciale. A titre d'exemple la centrale thermique de la Société Ivoirienne de Raffinage (SIR) utilise de l'eau d'un lac qui est situé (JACQUEVILLE, Côte d'Ivoire) à plus de 50 km de son lieu d'utilisation.

La centrale thermique de VRIDI (Energie Electrique de Côte d'Ivoire) utilise quant à elle l'eau de ville (SODECI). Il en est de même pour l'unité de Production de jus de fruit de l'Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA) et la chaufferie de l'huilerie (COSMIVOIRE). Notre objectif dans ce chapitre est de proposer des mesures et des procédés de traitement capables de rendre exploitables les eaux polluées des lacs de la ville de Yamoussoukro.

III.1 PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DES CHAUDIERES.

La composition de l'eau d'alimentation des chaudières doit être telle que les impuretés qu'elle contient, puissent avoir une concentration raisonnable dans la chaudière, sans dépasser les limites de tolérance. La pureté de [l'eau d'alimentation](#) dépend à la fois de quantité d'impuretés et aussi de leur nature. Certains éléments tels que la dureté, le fer et la silice sont plus concernés que les sels de sodium, par exemple. Les conditions de pureté pour n'importe quelle eau d'alimentation dépendent de la quantité d'eau utilisée ainsi que la conception particulière de la chaudière (pression, taux de transfert de chaleur, etc.) qu'elle peut tolérer. Les conditions de pureté de l'eau d'alimentation, de ce fait, peuvent énormément varier. Un tube de fumée à basse pression d'une chaudière peut généralement tolérer une dureté assez élevée de l'eau d'alimentation tandis que pratiquement toutes les impuretés doivent être éliminées de l'eau pour certaines chaudières modernes et à hautes pressions et à tubes d'eau. Seulement une gamme relative peut être donnée en tant que niveau maximum d'alcalinité, de sel, de silice, de phosphate, etc., en relation avec la pression de travail. Les niveaux maxima réels sont fournis par les fabricants de chaudière. Les tableaux des annexes 15 et 16 présentent les niveaux de recommandations de l'APAVE (Association des propriétaires d'unité électrique et de vapeur) et l'ABMA (Association Américaine de Fabricants de Chaudière) dans sa

garantie standard de la pureté de vapeur. Ces deux tableaux présentent d'un côté les recommandations des utilisateurs et de l'autre, les soucis des constructeurs. Globalement, les limites fixées sont dans les mêmes fourchettes.

Pour obtenir une bonne pression de service, les normes de fonctionnement des chaudières et des bâches alimentaires doivent être respectées.

III.2 PROPOSITION DE TRAITEMENT DES LACS

Globalement, le traitement des eaux de chaudières obéit à une démarche scientifique. Il faut pour ce faire :

- établir la qualité de l'eau brute
- estimer la quantité et la qualité du retour des condensas
- déterminer la qualité de l'eau d'alimentation requise (elle dépend du type de chaudière, de son timbre)

L'eau issue du traitement ne doit pas être entartrante, ni corrosive et doit pouvoir produire une vapeur de bonne qualité qui puisse assurer un fonctionnement sûr et à un coût optimum.

Mais le cas spécifique des lacs de Yamoussoukro, présente une eau brute polluée par les apports extérieurs ce qui influence négativement la qualité de l'eau brute. Traiter un tel type d'eau nécessite la prise de mesures à caractère environnemental en vue de réduire la charge polluante de l'eau. Ensuite, le processus normal de traitement physico-chimique peut se réaliser en suivant la démarche ci-dessus.

III.2.1 SUIVI ENVIRONNEMENTAL DES LACS

Le milieu aquatique est un milieu vivant, gouverné par des équilibres complexes entre une grande variété d'organismes végétaux et animaux (les producteurs primaires, les consommateurs et les décomposeurs). En l'absence de perturbateurs extérieurs, le système est généralement équilibré et il apparaît une autorégulation entre producteurs, consommateurs et décomposeurs. Lorsque le milieu reçoit des apports extérieurs trop importants (phosphates, nitrates, ...) comme les lacs de Yamoussoukro, l'équilibre écologique peut être perturbé. On assiste alors à une prolifération de la matière végétale qui s'accumule sur le site. Cette matière végétale est susceptible de modifier profondément les caractéristiques du milieu et de déplacer son équilibre physico-chimique. L'altération de la qualité de l'eau engendre des

difficultés dans sa potabilisation. La consistance physique de l'eau peut connaître des variations brutales et rapides, difficiles à gérer.

L'élimination des algues par coagulation / floculation est malaisée et entraîne des surconsommations de réactifs. Celle-ci peut également colmater les filtres si elles ne sont pas totalement éliminées.

L'eutrophisation des eaux étant généralement perçue comme une nuisance, beaucoup d'activités de recherche ont été réalisées pour parvenir à limiter ce phénomène. Pour que la réaction de photosynthèse se réalise, un certain nombre de conditions doivent être réunies : présence de lumière, d'éléments minéraux et de température suffisante. Parmi les conditions précitées, on ne peut agir que sur la quantité des minéraux disponibles. L'azote et le phosphore ont été étudiés pour tenter de contrôler l'eutrophisation. Mais d'après l'OCDE, le phosphore est dans 80% des cas étudiés dans les pays tempérés, l'élément qui détermine le développement de l'eutrophisation.

Comme l'eutrophisation est souvent une conséquence directe des rejets engendrés par les activités humaines, la prévention de ces phénomènes ne peut provenir que d'une action sur le comportement des populations riveraines vis-à-vis des lacs.

La réduction de la pollution dans les lacs de la ville de Yamoussoukro demande un contrôle de l'eutrophisation. La forte urbanisation des bassins versants étant l'un des facteurs d'eutrophisation, il faut doter la ville d'un système d'assainissement approprié à travers les opérations suivantes :

- ✚ la réhabilitation des systèmes d'assainissement collectifs (station d'épuration des eaux usées).
- ✚ la politique d'encouragement des systèmes d'assainissement autonomes
- ✚ la sensibilisation des populations riveraines pour le non rejet d'ordures ménagères dans les eaux.
- ✚ la recherche de moyens économiques et financiers en vue de faire face efficacement aux besoins de dépollution et de protection de l'environnement.

III.2.1.1 Assainissement collectif

Dans la ville de Yamoussoukro, existent des technologies classiques d'épuration des eaux usées. Malheureusement ces stations de traitement sont, depuis des années, hors d'état de fonctionnement normal. Cet état de fait a pour conséquence le rejet des eaux résiduaires dans les lacs sans le minimum de traitement. L'une des solutions à la pollution des lacs réside

dans la réhabilitation de ces stations de traitement d'eaux usées. Outre la remise en état de ces stations, l'urbanisation rapide avec l'augmentation de sa population nécessite l'installation de nouvelles stations ou l'emploi d'autres technologies dites alternatives collectives (lagunage surtout) ou l'intégration des stations extensives d'épuration dans le tissu urbain. Dans tous les cas il s'agit de protéger les lacs selon le principe du schéma1 ci-dessous.

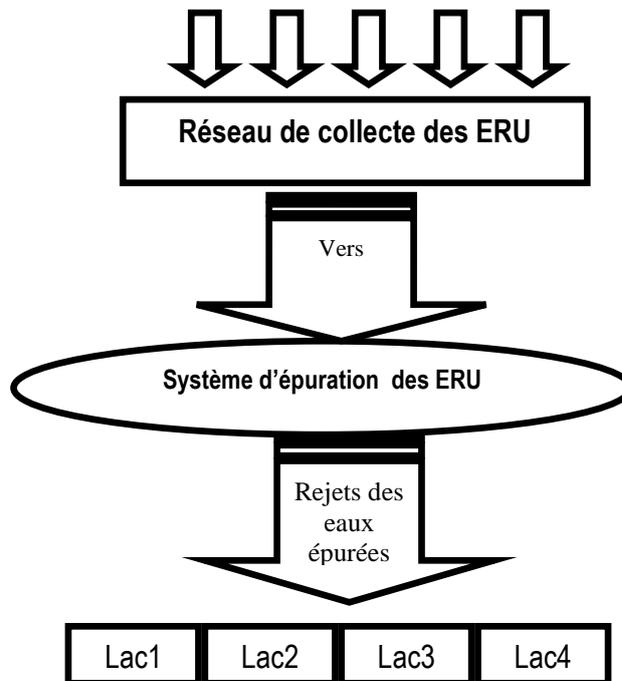


Figure3.1 : Processus de l'assainissement collectif

a) Le lagunage

Le lagunage consiste à épurer l'eau à travers une série de bassins successifs dont le premier est appelé bassin anaérobie, le second, bassin facultatif et le troisième, bassin aérobie ou de maturation. L'épuration biologique sur les bassins facultatif et aérobie se fait à travers la symbiose entre les algues et les bactéries. Par la photosynthèse, les algues mettent de l'oxygène à la disposition des bactéries qui dégradent à leur tour la matière organique contenue dans le milieu tout en fournissant aux algues du CO₂. En plus de cette élimination biologique, les bassins de lagunage favorisent la décantation à travers leurs grandes dimensions. Les boues décantées sont alors totalement digérées en raison de la longue période d'accumulation (au moins cinq (5) ans). Selon l'OMS (organisation Mondiale de la Santé) les eaux de lagunage peuvent être utilisées en agriculture.

b) Stations extensives d'épuration dans le tissu urbain.

Il s'agit d'étudier la possibilité d'épuration des eaux usées de la ville par sous bassin versant contrairement à l'épuration actuelle en un seul point éloigné de la ville. L'avantage de procéder de cette façon est de réduire les coûts des réseaux de collecte, de suivi et entretien et de protéger au mieux les lacs sans risques de saturation du système d'épuration. Le plan des lacs est tel que certains d'entre eux peuvent être utilisés pour servir de bassins de traitement.

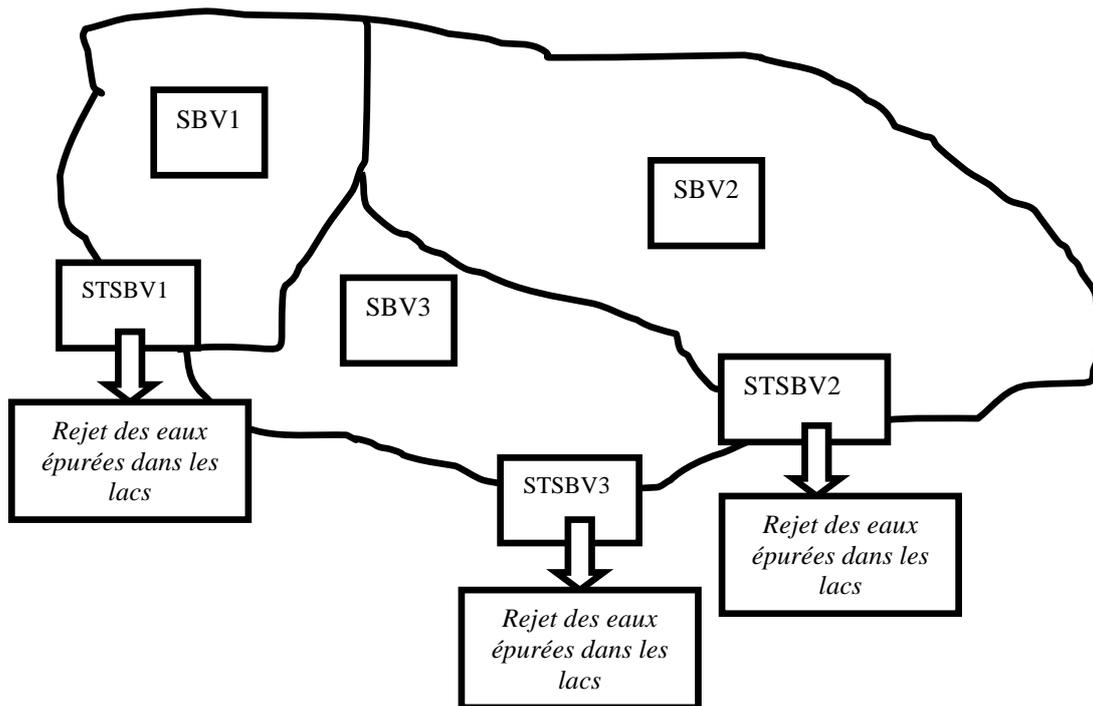


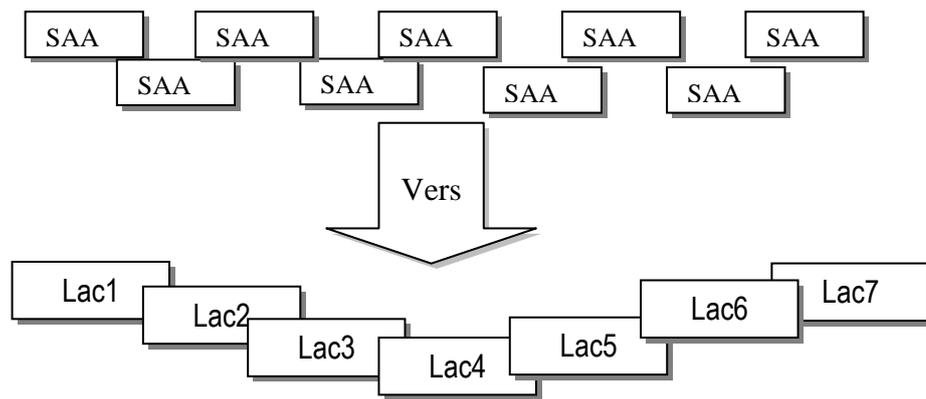
Figure3.2 : Principe de stations extensives d'épuration par sous bassin versant

SBV : Sous Bassin Versant ;

STSBV : Station de Traitement par Sous Bassin Versant

III.2.1.2 Assainissement autonome (in situ ou individuelle)

Contrairement à l'assainissement classique qui nécessite la collecte des eaux de la cité, l'assainissement in situ consiste à traiter au niveau local les eaux usées produites. Les technologies employées actuellement sont les fosses sceptiques. Plusieurs habitations de la ville sont équipées des fosses sceptiques, mais le problème réside dans leur vidangeage lorsque celles-ci sont pleines. Les fosses sceptiques sont conçues pour supprimer jusqu'à 90% des MES par décantation. La matière décantée doit pouvoir être totalement digérée par voie anaérobie.



SAA : système d'assainissement autonome

Figure3.3 : Processus de l'assainissement in situ (autonome)

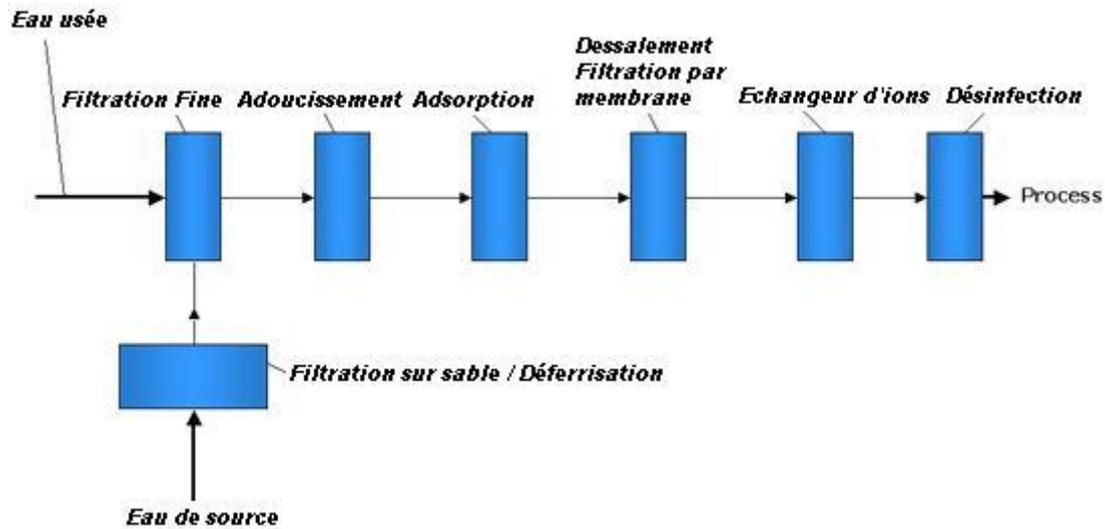
III.2.1.3 Sensibilisation des populations riveraines

Les populations urbaines africaines en général n'ont pas la culture de l'environnement. Une formation est nécessaire pour les amener à modifier les comportements, surtout vis-à-vis des déchets solides comme liquides. La législation n'est surtout pas rigoureuse ou du moins les moyens de contrôle n'existent pas. Les autorités de la ville doivent mener des campagnes de sensibilisation auprès des populations riveraines. La notion de protection de l'environnement doit être inculquée à tous par diverses voies (formation, éducation, sensibilisation, motivation voire répression...)

Le traitement environnemental des lacs mobilise des moyens économiques colossaux hors de portée des personnes privées et majoritairement de la responsabilité des autorités politiques et administratives de la ville de Yamoussoukro. Pour ce faire, il est nécessaire, pour les pouvoirs publics, d'instaurer des écotaxes. Ces taxes écologiques sont applicables à toutes les structures génératrices de pollution telles que les industries, les hôpitaux... Toutefois si ces mesures sont mises en œuvre, les eaux des lacs seront moins chargées en matières organiques, en matières en suspension, ... en somme la pollution sera considérablement réduite.

III.2.2 TRAITEMENT PHYSICO-CHIMIQUE

Le traitement physico-chimique des lacs de la ville peut se faire selon le principe général du schéma 3.4 ci-dessous. Nous subdivisons ce processus en deux grandes phases qui sont la phase du prétraitement et la phase de déminéralisation.



1.1 Figure.3.4 : Processus de traitement de l'eau

III.2.2.1 Le prétraitement

Avant tout traitement des eaux, les matières non dissoutes de grandes tailles sont éliminées par des processus appelés prétraitement. Ces opérations concernent principalement le dégrillage – le dessablage – la filtration – la floculation. Certaines matières dissoutes, nuisibles aux résines qui interviennent dans la déminéralisation, sont également éliminées dans ce processus par – déferrisation (précipitation du fer) – démanganisation (précipitation du manganèse) ou déchloration (élimination des ions chlorures).

Dégrillage/ dessablage

L'eau provenant des lacs est chargée de particules et de grains de sables de grandes tailles. En vue de protéger les pompes et les filtres, il est nécessaire d'intercaler dans le circuit des grilles pour retenir les particules flottantes de tailles supérieures aux dimensions des trous des grilles.

Filtration

Avant tout traitement chimique, l'eau doit être limpide et débarrassée de toutes les matières en suspension et colloïdales.

La filtration peut intervenir dans le processus final de la clarification pour retenir les floes ou les résidus de matières dissous après une décantation.

Coagulation / floculation.

La floculation est l'agglomération des particules déstabilisées ou coagulées en microfloc, puis en flocons volumineux et décantables. Cette opération de traitement ne peut s'effectuer qu'après coagulation. Elle fait partie des étapes du prétraitement. Son but est de déstabiliser les matières colloïdales en vue de former des particules de grandes tailles décantables ou qui surnagent. Elle intervient dans le processus de clarification ou décantation.

Deux phénomènes de transport régissent la floculation :

- la floculation péricinétique liée à la diffusion brownienne (agitation thermique). La vitesse de floculation ou variation du nombre de particules au cours du temps est donnée par :

$$- \frac{dn}{dt} = \alpha \frac{4kT}{3\eta} n^2 \quad (3.1)$$

n : nombre de particule par unité de volume

α : Fraction des chocs efficaces

k : constante de Boltzmann

η : Viscosité dynamique (kg/m.s)

- La floculation orthocinétique est liée à l'énergie dissipée. L'efficacité de cette floculation qui permet d'obtenir le floc volumineux séparable est donnée par :

$$\text{Régime laminaire : } - \frac{dn}{dt} = \frac{1}{6} \alpha d^3 n^2 \frac{dV}{dZ} \quad (3.2)$$

$$\text{Régime turbulent : } - \frac{dn}{dt} = kd^3 n^2 \frac{dV}{dZ} \quad (\text{avec } \frac{dV}{dZ}, \text{ gradient de vitesse}). \quad (3.3)$$

d : diamètre de la particule(m)

Déchloration

Les eaux des lacs étudiés contiennent une concentration assez importante en ions chlorures susceptibles de dégrader les résines anioniques du système de déminéralisation. Il faut donc procéder à la déchloration de l'eau avant la déminéralisation par injection de bisulfite de sodium ou catalytiquement sur charbon actif en grain.

Déferrisation / démanganisation

Le fer et les éléments métalliques (sous forme ionisée) en général sont des polluants des résines cationiques. Ils ont une très forte affinité avec ces dernières et, une fois fixés sur les résines, on ne peut les éluer en cycle de régénération normal. Le principe de base de la

déferrisation et de la démanganisation est la précipitation des ions Fe^{3+} et Mn^{4+} sous forme d'hydroxyde et retenu sur filtre, après oxydation.

Les oxydants nécessaires pour leur oxydation sont l'oxygène, le dioxyde de chlore, l'ozone et le permanganate de potassium.

Des procédés biologiques par la culture de bactéries spécifiques de fer et de manganèse dans des filtres permettent l'oxydation et la précipitation rapide de ces métaux.

III.2.2.2 Décarbonatation adoucissement

La figure 3.5, consécutive à la comparaison du titre alcalimétrique complet (TAC) au titre hydrotimétrique (TH), montre que dans tous les lacs, le TAC est supérieur au TH. La réduction de la dureté des eaux des lacs peut donc se faire par la méthode de décarbonatation suivie de l'adoucissement à travers le chaînage Cf - CF – DEG (résine cationique faiblement acide ; résine cationique fortement acide et dégazage). L'eau adoucie produite est utilisable dans des chaudières de basse et moyenne pression (0 à 40bars). Le cation fort est de la forme $R-Na^+$ et celui du cation faible est $R-H^+$. Le résultat est une eau adoucie et décarbonatée de $TH = 0.3 \text{ méq/L}$; de $TAC \approx 0.3 \text{ méq/L}$. et de $TDS = 115 \text{ ppm}$.

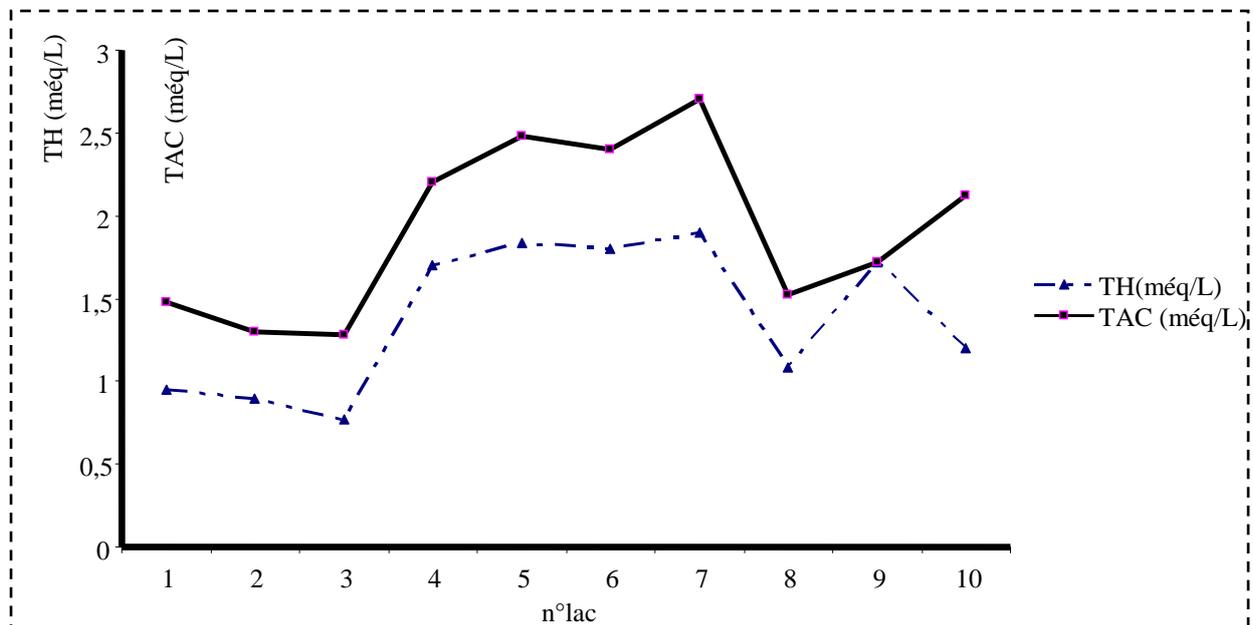
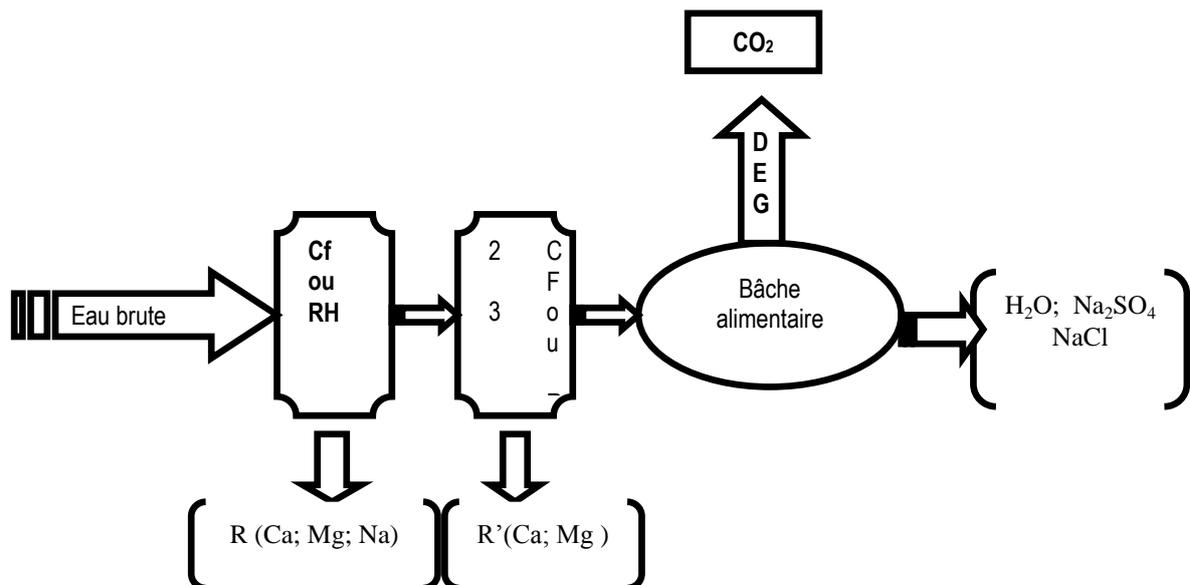


Figure3.5: Comparaison TAC et TH



3.1.1.1 Figure 3.6 : Principe du chaînage Cf – CF – DEG

III.2.2.3 La déminéralisation

La déminéralisation totale peut se faire par les Chaînages CF-Af-DEG ou CF-DEG-AF ou Cf-Af-DEG-AF ou CF-DEG-Af-AF.

Ces types de chaînages produisent de l'eau pour les chaudières à pression moyenne et pour certains procédés industriels. On installe le dégazeur juste après l'échangeur faiblement basique pour en obtenir la capacité maximale.

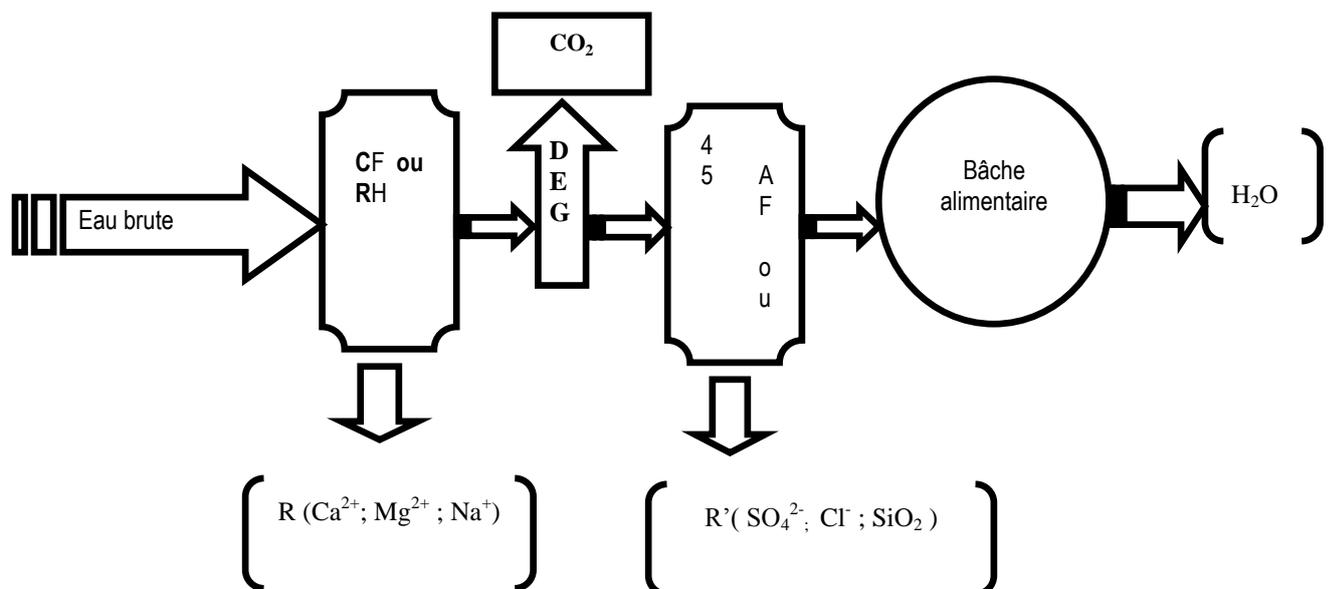


Figure 3.7 : Principe du chaînage CF-DEG-AF

AF : résine anionique fortement basique ; Af : résine anionique faiblement basique

CF : résine cationique fortement acide ; Cf : résine cationique faiblement acide

En aval des chaînes primaires de déminéralisation, on peut installer des échangeurs de finition destinés à éliminer les dernières traces de salinité. Le système de finition le plus répandu est le lit mélangé, composé de résines fortes. Les cations et les anions sont séparés par une couche de résine inerte. Il permet d'éliminer les fuites de sodium et de silice de la chaîne primaire.

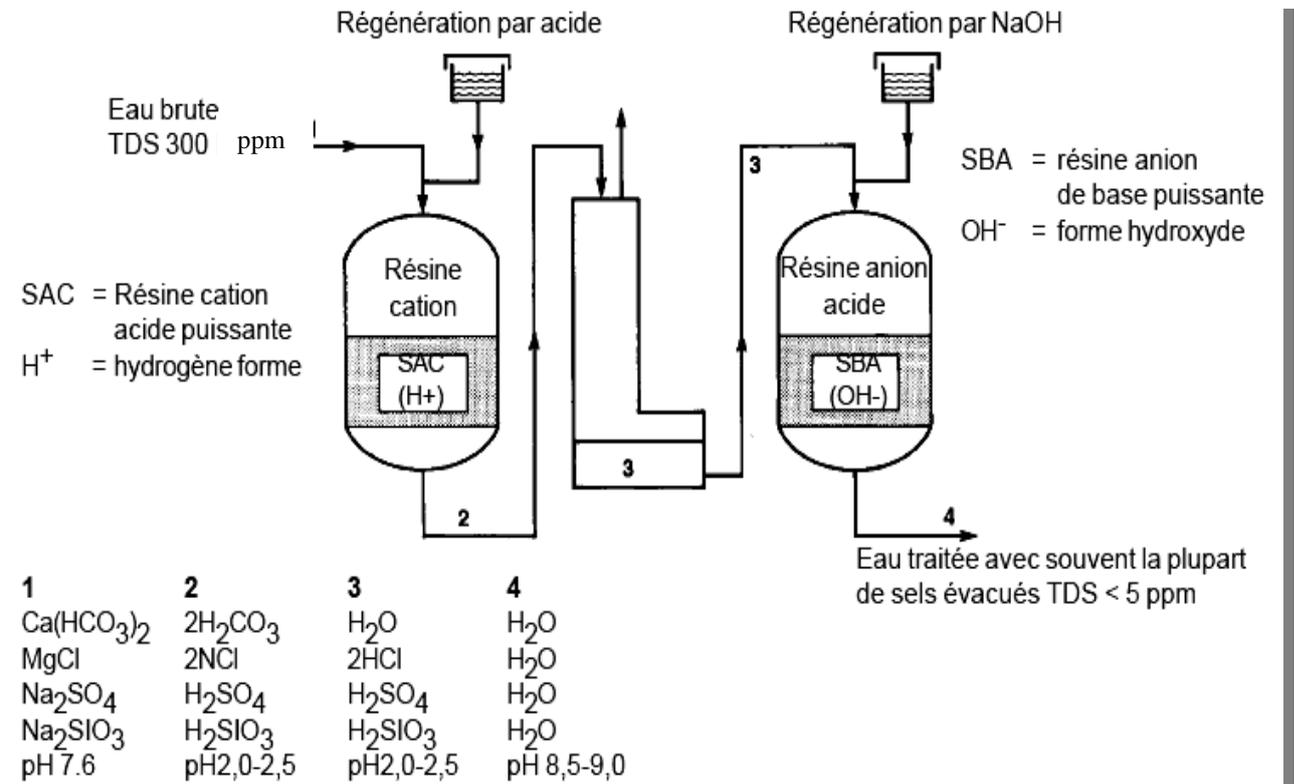


Figure 3.8 : Principe du chaînage CF-DEG-AF avec régénération

III.2.2.4 Décarbonatation à la chaux.

Cette technique a pour but d'éliminer les bicarbonates de calcium et de magnésium (dureté temporaire) en les précipitant sous forme de carbonates et hydroxydes de magnésium. Les boues résultant du traitement forment des cristaux durs et volumineux (carbonates de calcium) décantant à forte vitesse et des flocons (hydroxyde de magnésium) très légers précipitant mal. Toutefois, il subsiste, après traitement, un TAC résiduel de 3°f à 4°f dû à la solubilité du carbonate de calcium et de l'hydroxyde de magnésium.

a) Calcul de la dose de chaux.

Si TH > TAC :

Deux cas de figures se présentent :

1^{er} cas : $THMg \leq TH - TAC$

La dose de chaux nécessaire pour obtenir la précipitation du carbonate de calcium et la neutralisation du CO_2 libre est :

$$Ca(OH)_2 \text{ en } ^\circ f = (TAC + TCO_2) \text{ en } ^\circ f \text{ ou } 7,4(TAC + TCO_2) \text{ en } g/m^3 \quad (3.4.)$$

Si on désire précipiter à la fois le calcium et le magnésium, il faudra alors la dose de

$$\text{Dose de chaux} = 7,4(TAC + THMg + TCO_2) \text{ en } g/m^3 \quad (3.5)$$

2^{ème} cas : $THMg > TH - TAC$

On applique alors la dose de :

$$\text{Dose de chaux} = 7,4(TAC + THMg + TCO_2) \text{ en } g/m^3 \quad (3.6)$$

Si $TH < TAC$:

Ceci concerne les eaux bicarbonatées sodiques. On emploie toujours la règle précédente, mais on produira une eau chargée en carbonate de sodium et en hydroxyde de sodium. En ce qui concerne le cas spécifique des lacs de la ville de Yamoussoukro, on a les données suivantes :

Tableau.3.1 : Comparaison du THMg et du TH-TAC

N° \ lac	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TAC (°f)	7,4	6,8	6,0	11,4	12,4	12,0	13,6	7,6	8,6	10,6
TH (°f)	4,75	4,65	3,85	8,65	9,2	9,0	9,75	5,4	8,6	6,0
TH-TAC (°f)	-2,65	-2,15	-2,15	-2,75	-3,2	-3,0	-3,85	-2,2	0	-4,6
THMg (°f)	1,4	1,4	1,15	2,6	2,3	2,05	2,55	1,55	1,65	2,1

L'observation des données du tableau3.1 montre que $TH < TAC$ et $THMg > TH - TAC$ dans tous les lacs. Pour déterminer la dose de chaux nécessaire, nous faisons donc recours à la formule suivante :

$$Ca(OH)_2 = TAC + TMg + TCO_2 \text{ en } (^\circ f) \text{ soit } Ca(OH)_2 = 7,4(TAC + THMg + TCO_2) \text{ en } g/m^3 \quad (3.7)$$

D'après le diagramme de HALLOPEAU et DUBIN, le CO₂ libre de chaque lac est donné dans le tableau.3.2.

Tableau.3.2 : Teneur en CO₂ libre des lacs

Lacs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH	6,95	7,38	7,84	8,61	7,41	7,39	7,33	6,85	7,0	7,36
TAC (°f)	7,4	6,8	6,0	11,4	12,4	12,0	13,6	7,6	8,6	10,6
TCO₂ (mg/L)	15	5,5	1,8	0,55	10	9,5	13	20	17	9

Tableau 3.3 : Dose de chaux à appliquer à chaque lac.

Lacs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TAC (mg/L)	90,3	83	73,2	139,1	151,3	146,3	165,9	92,7	104,9	129,3
THMg (mg/L)	13,44	13,44	11,04	12,48	22,08	19,08	24,48	14,88	15,84	20,16
TCO₂ (mg/L)	15	5,5	1,8	0,55	10	9,5	13	20	17	9
Ca(OH)₂ (g/L)	0,88	0,75	0,64	1,13	1,36	1,30	1,50	0,95	1,01	1,18

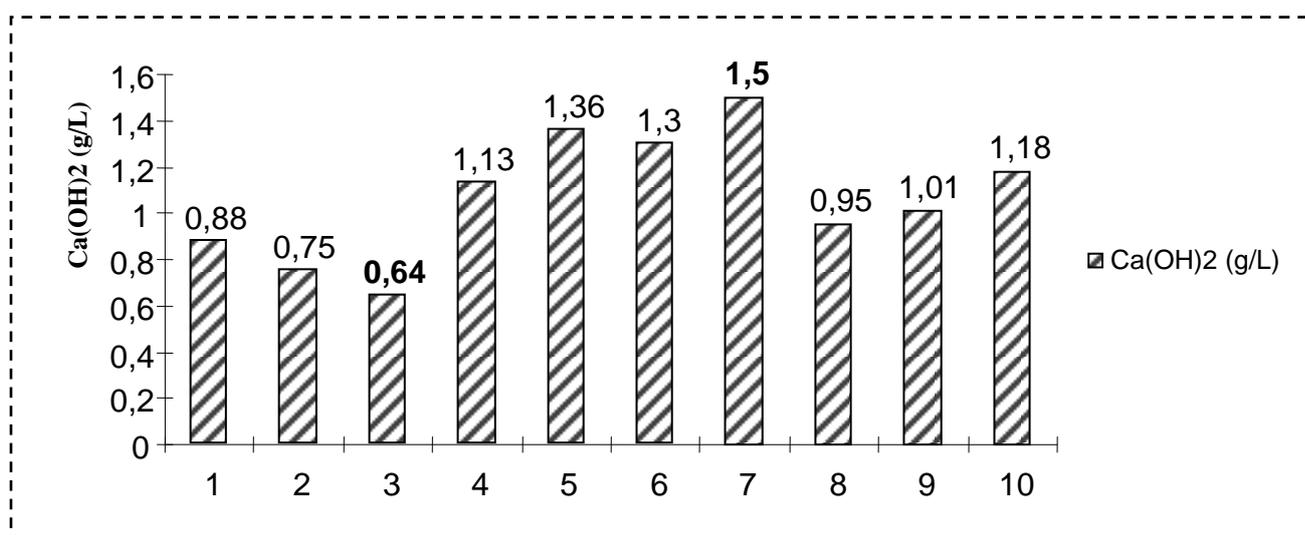


Figure 3.9: Dose de chaux Ca(OH)₂ (g/L) nécessaire à chaque lac

III.3 CONCLUSION PARTIELLE

Au regard du niveau de pollution des eaux des lacs de la ville de Yamoussoukro, tout projet d'exploitation industrielle de telles eaux exige un suivi environnemental de la part des autorités de la ville.

La manière idéale de protéger des lacs est la réduction de la pollution à la source. Cette possibilité exige un comportement responsable de la part des habitants de la ville ; pour y arriver, il faudra une formation-éducation de la population. L'autorité publique peut encourager et motiver les systèmes d'assainissement autonome.

La seconde alternative est l'application de mesures curatives en vue de réduire la pollution en aval. Ces mesures impliquent la réhabilitation des stations de traitement des eaux usées, l'institution des écotaxes en vue de financer la politique environnementale et en dernier recours, l'utilisation de technologies alternatives telle que le lagunage pour traiter les eaux usées.

La charge organique des lacs, la teneur en matières en suspension, la couverture végétale des différents lacs étudiés font que leur utilisation dans la chaufferie exige une procédure de traitement qui passe nécessairement par le prétraitement. La déminéralisation n'est possible qu'après prétraitement et peut se faire sur résines échangeuses d'ions ou par décarbonatation à la chaux.

.../...

CHAPITRE IV :

EXPLOITATION DES EAUX DES LACS DANS UNE CHAUFFERIE INDUSTRIELLE

INTRODUCTION

IV.1 DIMENSIONNEMENT DES DIFFERENTS ORGANES DE L'INSTALLATION

IV.2 ANALYSE ECONOMIQUE ET CHOIX DU PROCEDE DE TRAITEMENT

IV.3 EVALUATION ECONOMIQUE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

IV.4 EXPLOITATION DU LAC 5

IV.5 CONCLUSION PARTIELLE

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré au dimensionnement d'un circuit de traitement de l'eau du lac 5 en vue de son utilisation dans trois types d'installations différentes. Un dimensionnement des installations thermique sera ensuite proposé après une étude économique comparée de l'exploitation du lac 5 et de l'eau de ville.

IV.1 DIMENSIONNEMENT DES DIFFERENTS ORGANES DE L'INSTALLATION.

IV.1.1 PRESENTATION GENERALE DES INSTALLATIONS

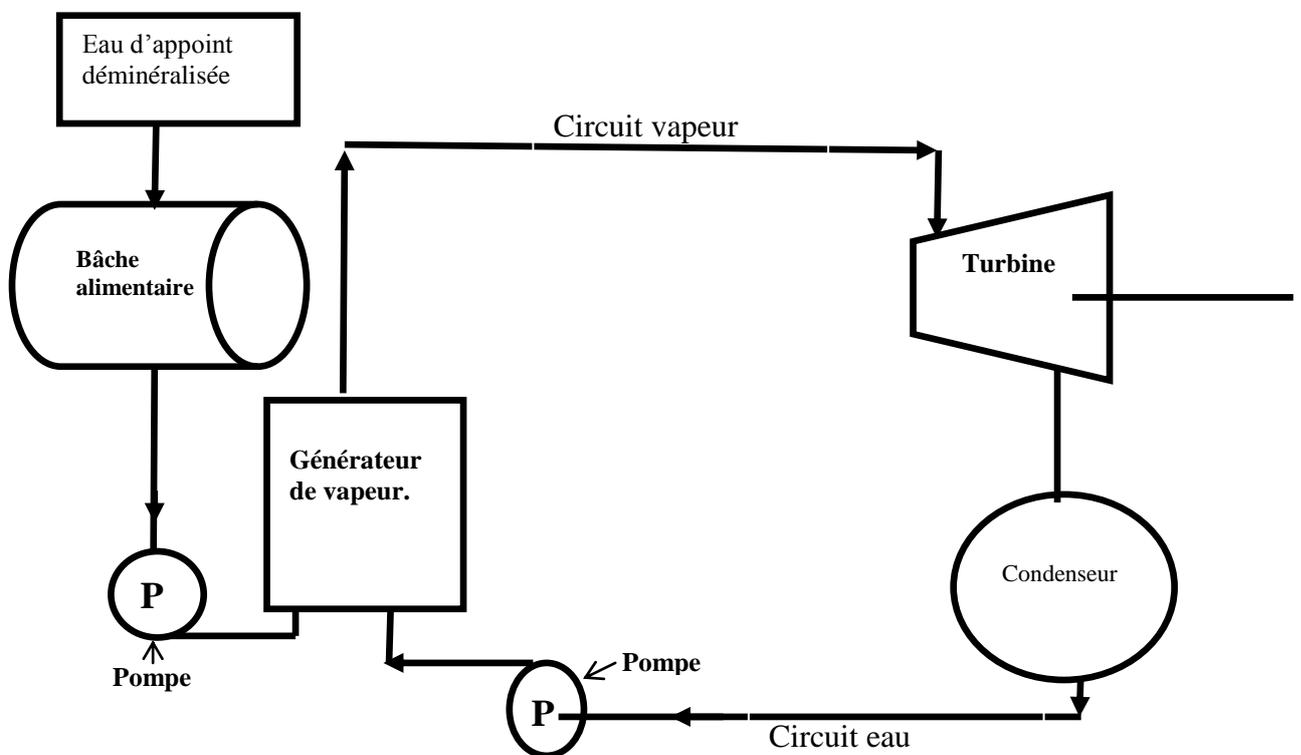


Figure 4.1 : Circuit de production de vapeur pour une centrale thermique

L'installation est constituée de deux grandes parties. Le circuit de traitement et de stockage et le circuit vapeur.

Le circuit de traitement de l'eau est composé des organes de traitement de l'eau tels que le filtre, le décanteur et l'adoucisseur.

Pour éviter la rupture de stock en eau d’approvisionnement, un réservoir de stockage est prévu. Dans ce circuit, existe une pompe qui aspire l’eau depuis le lac et la refoule dans le décanteur statique [64].

Le circuit vapeur prend naissance à partir de la bêche alimentaire pour fermer la boucle chaudière turbine (utilisation)-condenseur pompe chaudière.

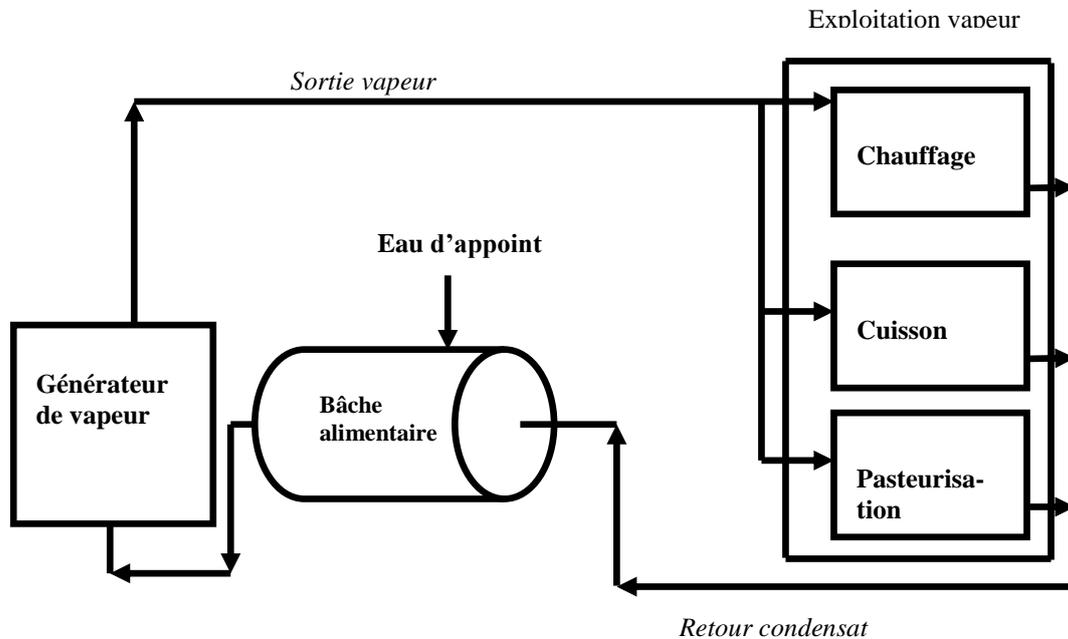


Figure4.2 : Circuit de production de vapeur pour le chauffage ou la cuisson

IV.1.2 DIMENSIONNEMENT DU CIRCUIT DE TRAITEMENT

Ce circuit est constitué d’une pompe d’aspiration protégée par un filtre, d’un décanteur statique qui permet de réduire les matières en suspension et ou colloïdales décantables. Un système de clarification (filtration sur sable ou charbon actif) permet d’éliminer le reste des matières en suspension afin d’éviter le colmatage rapide des résines.

Le système de déminéralisation permet de réduire ou d’éliminer totalement la dureté de l’eau. Ceci pour éviter les dépôts de tartre et la corrosion dans le circuit. La cuve de stockage a pour rôle d’assurer la sécurité alimentaire en eau du générateur de vapeur.

IV.1.2.1 Le décanteur statique

Le décanteur statique est un appareil qui permet aux particules flottantes de s’agglomérer à un rythme plus ou moins lent. Toute particule présente dans l’eau est soumise à deux forces : la force de pesanteur qui entraîne sa chute et les forces de frottements dues à

la traînée du fluide s'opposant à ce mouvement. STOCKES a établi, à partir de ces données, la loi qui permet de calculer la vitesse de chute v_{cp} d'une particule [54].

$$v_{cp} = \frac{\rho_p - \rho_e}{18\eta} g d^2 \quad (4.1)$$

ρ_p = masse volumique de la particule (kg/m^3) ; ρ_e = masse volumique du fluide (kg/m^3)

η = viscosité dynamique ($kg/m.s$) ; g = accélération de la pesanteur (m/s^2)

d = diamètre apparent de la particule (m).

Lorsque les particules en suspension sont de tailles très petites (matières colloïdales) la décantation est difficile et très lente souvent même impossible. L'une des solutions les plus courantes est la coagulation floculation. Il s'agit de déstabiliser les particules stables (colloïdales) pour permettre leur agrégation. Ces particules formées sont de tailles plus grandes et peuvent ainsi décanter ou surnager. La coagulation ou floculation consiste à introduire dans l'eau un produit capable de décharger les colloïdes chargés dans l'eau et de donner naissance à un précipité.

Le volume du décanteur statique (V_{DS} en m^3) est déterminé par la formule suivante :

$$V_{DS} = \frac{q_v \cdot h}{(\rho_p - \rho_e) g d^2} 18\eta \quad (4.2)$$

Avec

h = hauteur de chute ou du décanteur (m)

q_v = débit du fluide dans le circuit (m^3/s).

A défaut de toutes les données mentionnées ci-dessus, il est possible d'estimer le temps de séjour du fluide dans la cuve par des tests au laboratoire (Jar-test) et de calculer le volume du décanteur. On aura donc :

$$V_{DS} = q_v \cdot t_s \quad (4.3)$$

Avec t_s = temps de séjour de l'eau dans le décanteur statique (en seconde).

IV.1.2.2 La cuve de stockage

L'installation comporte un ensemble de matériels permettant l'évacuation de l'excès d'eau, son stockage à la pression atmosphérique, puis sa réintroduction dans le réseau, selon les variations de température et de pressions de celui-ci. Ce système rentre dans le cadre des groupes de maintien de pression. L'intérêt principal de ce système réside dans le fait que le réservoir de stockage n'a pas à résister à la pression du réseau. Une simple bache reste le

dispositif de stockage le plus économique mais il présente trois inconvénients majeurs : la corrosion de la bête, la perte d'eau par évaporation et l'aération de l'eau.

Ici il s'agira d'un réservoir tampon auquel on adjoint un dispositif à pression variable de petite capacité. Il amortit les variations brusques de pressions (anti-bélier) et diminue la fréquence des évacuations et de réintroductions d'eau.

La régulation est simplifiée et se compose seulement de deux boucles tout ou rien. Les valeurs de consigne sont choisies pour réserver une zone neutre.

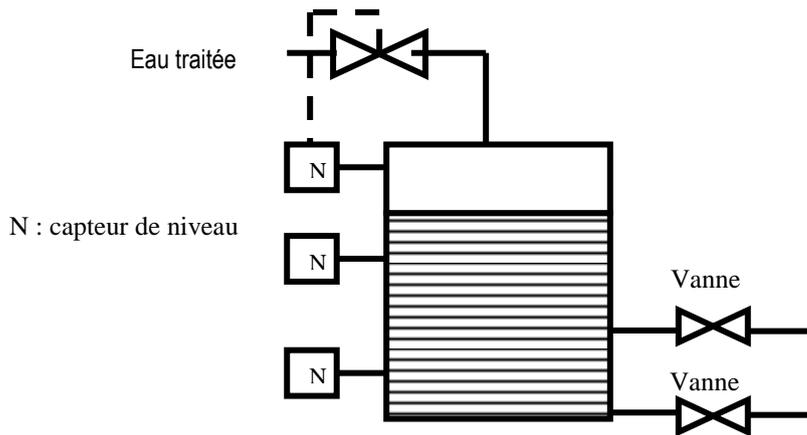


Figure 4.3 : Principe d'un réservoir de stockage

IV.1.2.3 La tuyauterie

a) Débit

Connaissant la puissance de chaque appareil terminal, on calcule le débit volumique qui le traverse par la formule de base suivante :

$$q_v = \frac{\bar{W}_{AT}}{\rho_v C \Delta\theta} \quad \text{en m}^3/\text{s} \quad (4.4)$$

Avec

\bar{W}_{AT} = puissance de l'appareil (W)

ρ_v = masse volumique de l'eau (kg/m³)

$\Delta\theta$ = écart de température entre l'allé et le retour (°C ou K)

C = capacité calorifique à pression constante (J/kg.K)

b) Diamètre des tuyauteries de conduite

En générale, l'énergie hydrostatique nécessaire à la circulation du fluide dans le réseau est apportée par une pompe. Le choix du diamètre des tuyauteries doit satisfaire aux besoins de réduction du coût de la pompe, de l'énergie consommée par la pompe et des bruits d'écoulements. (R.C. FELLING and W.J. COOK 1985)

Il existe deux méthodes pour déterminer le diamètre d'une tuyauterie, en tenant compte au départ de l'un ou de l'autre des facteurs suivants :

- La vitesse d'écoulement ;
- La perte de charge.

Ainsi pour la vitesse d'écoulement, le diamètre de la tuyauterie se déduit de la formule suivante :

$$D = [(4q_m \times V_s) / (\pi \cdot v)]^{1/2} \quad (4.5)$$

q_m : débit massique (kg/s)

v : vitesse (m/s)

V_s : volume spécifique (m³/kg)

L'expérience montre qu'une vitesse raisonnable de la vapeur saturée se situe entre 20 et 30 m/s. Aux vitesses plus grandes, le passage de la vapeur y devient bruyant et l'érosion devient sensible, surtout si la vapeur est humide.

Mais comme la vitesse a une grande influence sur la perte de charge, le choix d'une vitesse aux environ de 15m/s sera plus sage dans les cas où il convient d'éviter une chute de pression trop prononcée. On se servira généralement de cette méthode pour le choix du diamètre des connexions reliant la tuyauterie-mère aux divers récepteurs de l'installation. En ces endroits, il est recommandé de ne pas dépasser une vitesse de 15m/s.

Cependant, si l'on détermine le diamètre des tuyauteries en se basant uniquement sur une vitesse que l'on s'impose, sans tenir compte des longueurs de trajet, on arrive à des chutes de pression très irrégulières dans le réseau de distribution ; plus le parcours sera long, moins il y aura de pression disponible au point d'utilisation.

On a recours dans ces cas là à la méthode où l'on se fixe une perte de charge admissible. En s'imposant la perte de charge, la chute de pression, ou perte de charge, entre deux points 1 et 2 d'une tuyauterie dépend du trajet, de la longueur de trajet, du diamètre de la tuyauterie, de la vitesse du fluide, de son volume spécifique, de la rugosité des parois et de la viscosité du fluide. Divers chercheurs ont établi des formules empiriques qui donnent la perte de charge en fonction de ces diverses grandeurs.

Nous utiliserons la méthode de perte de charge pour le dimensionnement des tuyauteries de distribution et les canalisations où une perte de charge admissible est imposée.

Pour les collecteurs de distribution par exemple, on pourra utiliser la méthode des vitesses imposées. Dans ce cas, nous nous fixerons une vitesse de 15m/s comme il est recommandé.

Nous vérifierons par la suite que la perte de charge réelle est compatible avec celle admissible.

c) Problèmes économiques relatifs aux conduites

Dans le cas d'un circuit industriel comportant une pompe ou une turbine, le diamètre de la conduite n'est pas imposé, comme dans un transvasement, par les lois de l'écoulement. Il sera le plus souvent déterminé par des conditions économiques.

Si on choisit un petit diamètre, les frais d'investissement seront plus faibles, mais les pertes d'énergie en exploitation plus élevées (ce qui correspond à une dépense pour une pompe ou à un manque à gagner pour la turbine).

Au contraire, si on augmente le diamètre, les frais d'investissement augmentent et les pertes d'énergie en exploitation diminuent.

La solution idéale consiste à choisir un compromis entre ces deux points de vue. A titre d'exemple, nous allons faire un calcul simplifié en ne tenant compte que de la conduite. Le prix de la conduite est proportionnel à sa masse. A contrainte égale, l'épaisseur est proportionnelle au diamètre. La valeur de l'annuité de l'amortissement (A_1) peut donc se mettre, pour une installation donnée, sous forme :

$A_1 = k_1 D^2$, k_1 étant un coefficient qui dépend de la longueur, du prix unitaire, du mode de montage et de la durée de l'amortissement.

L'énergie annuelle perdue par frottement est proportionnelle à J . D'après l'expression,

$$J = \frac{\lambda v^2}{2Dg} L = \frac{8\lambda L q_v^2}{\pi^2 g D^5} \quad (4.6)$$

On peut mettre la perte annuelle (A_2) correspondante sous la forme :

$A_2 = \frac{k_2}{D^5}$, avec k_2 dépendant des autres caractéristiques données et du prix de l'énergie. La

dépense annuelle totale est donc :

$$A = A_1 + A_2 = k_1 D^2 + \frac{k_2}{D^5}, \quad (4.7)$$

A est minimale pour la valeur de D qui annule $\frac{dA}{dD}$. soit :

$$\frac{dA}{dD} = 2k_1D - 5 \frac{k_2}{D^6} = 0; \quad \text{soit} \quad \frac{2}{5} k_1 D^2 = \frac{k_2}{D^5}. \quad (4.8)$$

Avec,

J : perte de charge linéique (m/m) ; L : longueur de la conduite (m) ; D : diamètre de la conduite (m) ; q_v : débit volumique de la vapeur (m^3/s) ; g : accélération de la pesanteur (m/s^2) ; λ : coefficient de perte de charge.

Avec les hypothèses faites, le diamètre optimal est celui pour lequel le prix de la perte d'énergie annuelle est les deux cinquième de l'annuité d'amortissement.

Cette méthode n'est pas absolument valable dans tous les cas ; d'autres facteurs pouvant intervenir comme le risque de coups de bélier, l'impossibilité d'admettre de trop grandes variations de charge en fonction du débit, l'utilisation de diamètre et d'épaisseur variables pour l'alimentation des turbines à haute pression,... [64]

IV.1.2.4 L'adoucisseur

- **Le volume des résines**

Les résines échangeuses d'ions disposent pour chaque type de résine des courbes et des abaques qui permettent de déterminer la capacité utile de la résine, la fuite ionique et la quantité de régénérant (et le mode de régénération).

En exploitant les données de bases telles que :

- ✚ l'analyse de l'eau brute
- ✚ le débit à traiter
- ✚ la qualité requise de l'eau traitée
- ✚ les types de résines à mettre en œuvre
- ✚ la durée du cycle de production
- ✚ les types de régénérant et la température de production et de la soude pour la régénération des anions ; on détermine la capacité utile de la résine.

Le volume de résine est calculé en vérifiant l'équation suivante :

$$V_R = \frac{M_{SEB} \cdot V_C}{M_{CR}} \quad \text{en } m^3 \quad (4.9)$$

Avec : V_R = volume de résine (m^3) ; V_C = volume de cycle (m^3) ; M_{SEB} = salinité de l'eau brute à fixer par la résine considérée, en $éq/m^3$ ou en $még/l$; M_{CR} = capacité utile de la résine en $éq/m^3$ de résine.

Les diamètres des échangeurs doivent être fixés en tenant compte de certains critères limitatifs qui sont :

- les charges volumiques sur chaque colonne, comprise entre 4 et 50 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- les hauteurs de couches de résines entre 0.7 et 2.6m
- la perte de charge due à la hauteur de couches de résines et à sa granulométrie.

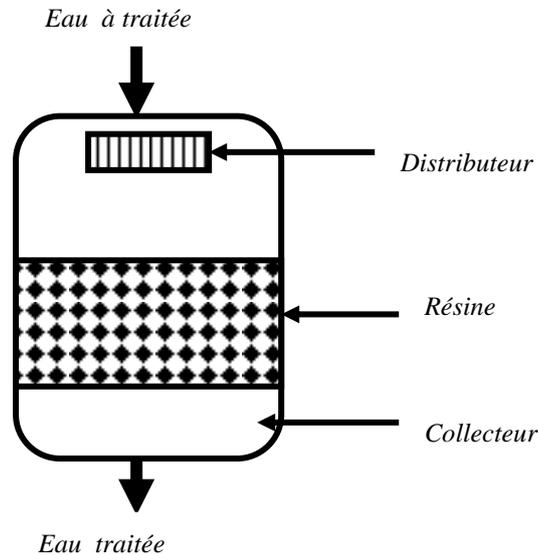


Figure4.4 : Coupe d'une colonne d'échange d'ions à co-courant

IV.1.3 DIMENSIONNEMENT DU CIRCUIT VAPEUR

Le circuit de vapeur est constitué des organes essentiels suivants : la chaudière, la pompe, le condenseur et la turbine (pour les centrales) ou le circuit de chauffage.

IV.1.3.1 Générateur de vapeur

Le générateur est un ensemble d'organes qui réalisent la fonction de transfert de l'énergie calorifique libérée par la combustion du fluide qui la transportera jusqu'au point d'utilisation. Les organes essentiels sont la chaudière (tubes vaporisateurs, réservoir et foyer), l'économiseur, le surchauffeur et le resurchauffeur.

IV.1.3.2 Economiseur

C'est un échangeur de type méthodique constitué par un faisceau tubulaire installé dans le parcours des gaz de combustion dans la zone finale du carneau des fumées ; cet appareil récupère une partie des calories restant dans les gaz et les transfère à l'eau

d'alimentation dont la température peut être par exemple, de 190 à 250°C.[3]. Cet appareil permet :

- d'améliorer le rendement de l'installation en diminuant les pertes par chaleur sensible des gaz de combustion évacuées.
- De diminuer les contraintes thermiques dans le métal du réservoir qui seraient élevées si l'on y introduisait de l'eau insuffisamment dans les tubes écrans. Son principe de dimensionnement est le même que les échangeurs thermiques.

Le gain d'énergie au sein de l'économiseur est de 10 à 12% pour un fluide essentiellement liquide.

IV.1.3.3 Chaudière

a) Dispositions générales des chaufferies

Les chaufferies et les autres locaux de service doivent être de dimensions suffisantes pour que les opérations de la chauffe et de l'entretien courant s'effectuent sans danger :

- chacun d'eux doit offrir au personnel des moyens de retraite dans deux directions au moins ;
- les portes doivent s'ouvrir vers l'extérieur ;
- les locaux doivent être bien éclairés et suffisamment ventilés pour que la température n'y soit jamais exagérée ;
- l'accès des plates formes des massifs doit être interdit à toute personne étrangère au service des chaudières ; ces plates formes doivent posséder des moyens d'accès praticables, elles doivent, si cela est nécessaire être accompagné de conducteur, les passages de service auront une hauteur libre d'au moins 1,80m.

b) Conditions d'emplacement des chaudières

Les possibilités d'emplacement sont déterminées par la catégorie du générateur.

La classification a pour base le produit caractéristique :

$$V_{CH} \cdot (T_{sat} - T_v) \quad (4.10)$$

Avec T_{sat} : température de saturation, en °C, correspondant au timbre

$T_v = 100^\circ\text{C}$, température de vaporisation de l'eau à la pression normale.

V_{CH} : le volume en m^3 de la chaudière complète, y compris ses surchauffeurs d'eau et surchauffeurs de vapeur, mais en faisant abstraction des parties constituées par des tubes ne mesurant pas plus de 10cm de diamètre intérieur, et des éléments de jonction entre ces tubes n'ayant pas plus de $1dm^2$ de section intérieure.

Une chaudière est de **première catégorie** quand le produit caractéristique est supérieur à 200 ; de **deuxième catégorie** quand ce produit est égal ou inférieur à 50.

Une chaudière de première catégorie doit être en dehors de 10m au moins de toute maison d'habitation et de tout bâtiment fréquenté par le public. Le local où sont établis les appareils ne peut être surmonté d'étages.

Une chaudière de la deuxième catégorie doit être en dehors de toute maison habitée et de tout bâtiment fréquenté par le public.

c) Mise en service

Une chaudière neuve ne peut être mise en service qu'après avoir subi une visite et une épreuve hydraulique, effectuée par un organisme vérificateur agréé. Ces opérations ont lieu, en principe, chez le constructeur dans le cas des chaudières transportées toute montées, et sur le lieu d'emploi après montage, pour les chaudières plus importantes. C'est le constructeur qui fait la demande et fournit les demandes nécessaires.

Les économiseurs, surchauffeurs et séparateurs de vapeur sont considérés comme faisant partie de la chaudière pour tout ce qui concerne les questions d'épreuve.

L'épreuve consiste à soumettre la chaudière à une pression hydraulique supérieure à la pression effective qui ne doit être dépassée dans le service. Cette pression d'épreuve est maintenue pendant le temps nécessaire à l'examen de la chaudière. Toutes les parties de celle-ci doivent être examinées pendant l'épreuve.

La surcharge d'épreuve est égale, en bars :

- à la pression effective, avec un minimum de 0,5, si le timbre n'excède pas 6,
- à 6, si le timbre est supérieur à 6 sans excéder 12,
- à la moitié de la pression effective si le timbre excède 12.

d) Calcul des faisceaux vaporisateurs

Les faisceaux vaporisateurs sont constitués presque uniquement de tubes écran d'eau tapissant les parois de la chambre de combustion. Ils sont soumis au rayonnement de la flamme et la chaleur qu'ils reçoivent est transférée à l'eau qui s'y vaporise sous forme de

bulles. Les vaporisateurs sont le siège de la vaporisation de l'eau qui gagne environ 60% d'énergie. C'est la zone où le transfert d'énergie est de loin la plus intense ; le reste du circuit est parcouru par la vapeur qui est supposée pure et n'entraînant pas de particule susceptible de se déposer dans les conduites.

La surface d'échange est donnée par la formule suivante :

$$S_m = 2\pi.R_{mL}.L_T = 2\pi.R_{mL}.n_t.l_t \quad (4.11)$$

R_{mL} : rayon moyen logarithmique (m) ; L_T : longueur totale des tubes (m) ; n_t : nombre de tubes

l_t : longueur d'un tube(m).

e) Puissance utile de la chaudière.

Par la méthode directe, la puissance utile est sous la forme :

$$\bar{W}_U = q_m.C_{pe}.(T_{sv} - T_{ee}) \quad \text{ou} \quad \bar{W}_U = K_m S_m.f \Delta T_{LM} \quad (4.12)$$

Avec \bar{W}_U : Puissance utile en W ; q_m : débit massique d'eau en kg/s ; T_{sv} : température de sortie de la vapeur en °C ; T_{ee} : température d'entrée de l'eau en °C ; K_m : coefficient d'échange global moyen ; S_m : surface moyenne d'échange.

ΔT_{LM} : moyenne logarithmique de la différence de température globale (°Cou K).

f : facteur de correction. ($f \leq 1$) ; C_{pe} : capacité calorifique (J/kg.K)

$$\Delta T_{LM} = \frac{Ecart_{max i} - Ecart_{min i}}{\ln \frac{Ecart_{max i}}{Ecart_{min i}}} \quad (4.13)$$

$Ecart_{max i}$: écart maxi de température entre les deux fluides (°Cou K).

$Ecart_{min i}$: écart mini de température entre les deux fluides (°Cou K).

f) Puissance fournie par la chaudière.

$$\bar{W}_F = q_m.h_v \quad (4.14)$$

Avec \bar{W}_F : Puissance fournie en kW. ; h_v : enthalpie massique de la vapeur produite en kJ/kg. ; q_m : débit massique de la vapeur en kg/m³

g) Le réservoir

Le réservoir constitue une enceinte de mélange dans laquelle se trouvent réunies la phase liquide et la phase gazeuse de l'eau du générateur. La température de l'eau du réservoir est par conséquent la température de saturation correspondant à la pression qui règne dans cette enceinte.

h) Les surchauffeurs et resurchauffeurs.

La vapeur saturée venant du réservoir passe dans les tubes des surchauffeurs successifs où sa température est élevée, à pression constante. La valeur de la surchauffe et de la resurchauffe est limitée par les conditions de résistances des métaux aux températures élevées. Ce sont des échangeurs thermiques au niveau desquels la transmission de la chaleur se fait en partie par convection et l'autre partie par convection et par rayonnement. Le choix de la chaudière est fait en fonction de sa puissance.

IV.1.3.4 LES POMPES

a) Différentes étapes du dimensionnement

Les étapes à suivre pour le dimensionnement d'une pompe sont :

- **Spécifications procédés**

- nature du produit (eau)
- viscosité
- température de pompage
- tension de vapeur
- densité à température de pompage
- corrosif ou non corrosif

- **Calcul du débit**

- $Q_{\text{calcul}} = K_s \times Q_{\text{nominal}}$

K_s est le coefficient de sécurité.

$K_s = 1,25$ pour les pompes de charge

$K_s = 1,2$ pour les pompes de reflux,

$K_s = 1,1$ pour les autres services

- **Définition des pressions**

- pression aspiration
- pression refoulement

- pression différentielle
- hauteur manométrique
- **NPSH disponible**
- **Puissances**
 - puissance hydraulique
 - rendement de la pompe
 - puissance de la pompe
 - puissance du moteur
 - rendement du moteur

b) Caractéristiques du fluide véhiculé.

On indiquera les caractéristiques suivantes pour l'eau pompée :

- la température de pompage pour le choix de la garniture et le calcul mécanique de la pompe
- la viscosité, sa tension vapeur et sa densité à température de pompage.

Débit nominal

On indiquera la valeur nominale du débit pour le cas dimensionnement. Le débit de calcul est défini comme suit :

$$Q_C = K \times Q_{nominal} \quad (4.15)$$

K est le coefficient de sécurité dont les valeurs moyennes sont les suivantes :

- 1,25 pour les pompes de charge,
- 1,2 pour les pompes de reflux,
- 1,1 pour les autres services.

Définition des pressions

Le calcul des pertes de charges à l'aspiration et au refoulement des pompes se fait après avoir fait l'isométrie des lignes d'aspiration et de refoulement et recenser tous les équipements (aéros, vannes automatique, etc) sur les différents circuits (aspiration et refoulement).

On indiquera respectivement les grandeurs suivantes :

- pression aspiration,
- pression refoulement,
- pression et hauteur différentielles
 - **La pression aspiration**

La pression aspiration à la bride d'aspiration est calculée en soustrayant les pertes de charges maximales à atteindre dans les lignes et équipements des systèmes d'aspiration, de la pression amont maintenue au point de pression constante (bâche alimentaire).

On prendra également en compte la différence de niveaux de liquide entre le récipient d'aspiration et la bride d'aspiration de la pompe. La pompe alimentaire est en charge.

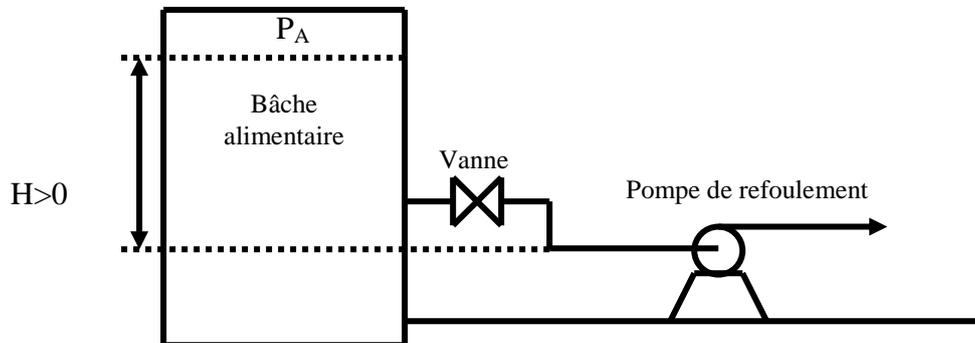


Figure4.5 : Schéma d'installation d'une pompe en charge

$$P_{asp} = P_A - \Delta P + P_h \quad (4.16)$$

P_{asp} : pression aspiration en bars eff.

P_h : pression hydrostatique, tient compte de la différence de niveaux entre le récipient d'aspiration et la bride d'aspiration de la pompe. $P_h = \frac{H \cdot \rho_T}{10,2}$, avec (H : différence de niveaux d'eau ; ρ_T : densité de l'eau à la température de pompage).

ΔP : pertes de charge à atteindre dans la ligne et les équipements à l'aspiration en bars.

- **Pression au refoulement**

La pression de refoulement d'une pompe est calculée en ajoutant les pertes de charge à atteindre dans les lignes et équipements et dans les vannes de contrôle à la pression aval maintenue au point de pression constante. On tiendra également compte des différences de niveaux entre le récipient de refoulement et la bride de refoulement.

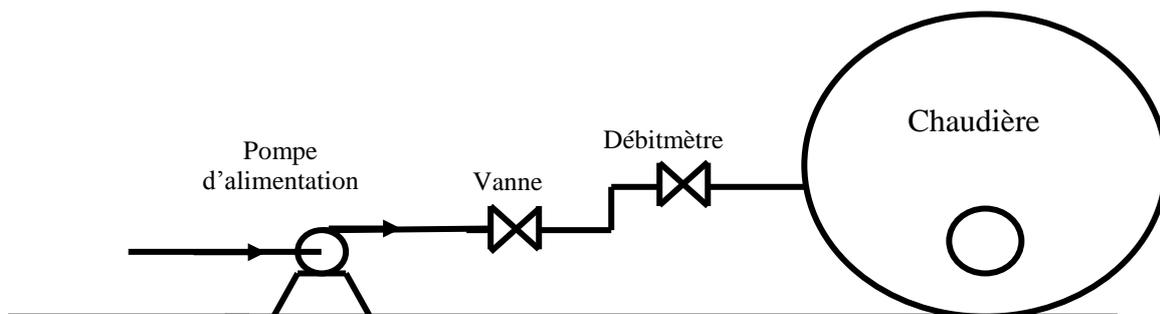


Figure4.6 : Schéma d'installation d'une pompe au refoulement

$$P_{\text{ref}} = P_A + \Delta P + P_h \quad (4.17)$$

P_{ref} : Pression de refoulement en bars eff. (ou en bars abs),

P_h : Pression hydrostatique = $\frac{Z \times d_e}{10,2}$ avec la différence de niveaux entre la bride d'aspiration

et le niveau du récipient pris au point

ΔP : Perte de charge dans le circuit de refoulement des pompes en bars.

$d_e = \rho_T$: densité de l'eau

NB : La pression au refoulement est calculée en considérant la côte maximale du bac de refoulement.

- **Pression et hauteur différentielle**

La pression différentielle est la différence de pression entre la pression de refoulement et la pression d'aspiration. Elle est exprimée en bars. La hauteur différentielle aussi appelée hauteur manométrique est la hauteur correspondante à cette hauteur de pression.

$$P_{\text{différentielle}} \text{ (bars)} = P_{\text{refoulement}} - P_{\text{aspiration}} \quad (4.18)$$

$$H_{\text{différentielle}} = H_{\text{mt}} \text{ (m)} = \frac{P_{\text{refoulement}} - P_{\text{aspiration}}}{\rho \times g} = \frac{10,2 \times (P_{\text{refoulement}} - P_{\text{aspiration}})}{\rho_T} \quad (4.19)$$

c) Le NPSH disponible (Net Positive Suction Head ou hauteur de charge nette absolue)

La cavitation provient d'une dépression interne au circuit d'aspiration provoquée par la diminution de la pression du liquide au-dessus de sa pression de vapeur saturante à la température correspondante. La cohésion interne du fluide est alors rompue ; il y a formation de cavités, de bulles de vapeur contenant de l'eau évaporée et parfois de l'air. Lorsque la pression retrouve sa valeur normale, les cavités se referment en produisant, en ces endroits, une augmentation énorme de la pression et de la température pouvant être à la base de sérieux dégâts mécaniques dans les conduites et dans le rotor.

Le NPSH est simplement une mesure permettant de quantifier la hauteur manométrique d'aspiration disponible pour éviter la vaporisation au niveau le plus bas de la pression dans la pompe. Il existe deux types de NPSH :

- le NPSH de la pompe (NPSH requis) dépendant des caractéristiques de la pompe (vitesse et pertes de charges internes). Il est donné par le constructeur de la pompe.
- Le NPSH de l'installation (NPSH disponible) qui dépend de la tuyauterie d'aspiration et des conditions de pompage du liquide.

Pour éviter la cavitation, la condition suivante est nécessaire :

$NPSH_{disponible} \geq NPSH_{requis}$

Le NPSH requis est fourni par le constructeur de la pompe.

Le NPSH disponible est fourni par le demandeur pour le choix de la pompe.

$$NPSH_{disponible} = Z + \frac{P_A - T_V}{\rho \times g} - \Delta P \quad (4.20)$$

Avec

Z est la cote du point d'aspiration par rapport à l'axe de référence de la pompe (m).

ΔP : Pertes de charge à l'aspiration de la pompe en bars.

Comme la pompe est en charge alors $Z > 0$.

T_V : tension vapeur ; et P_A : pression d'aspiration.

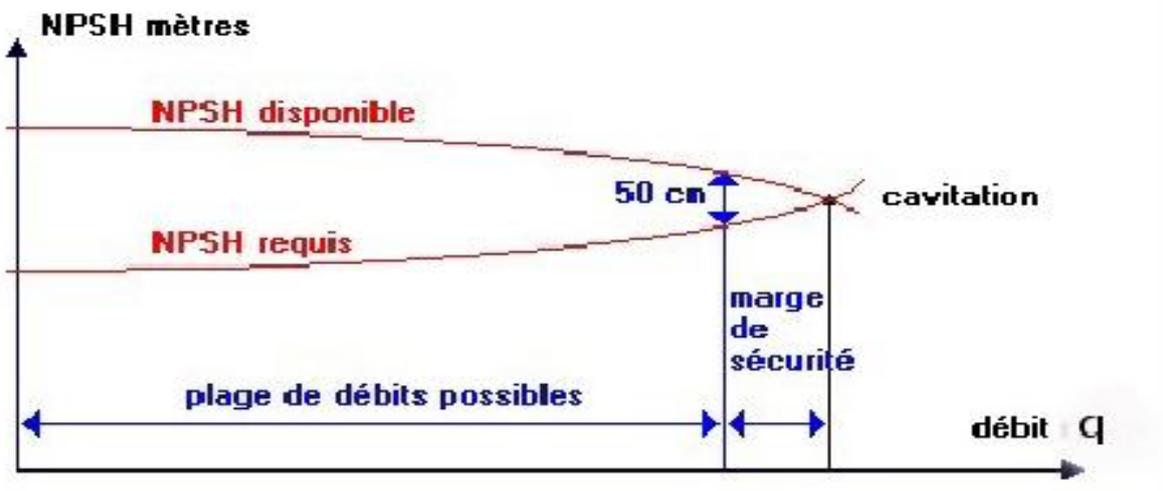


Figure 4.7 : Plage de débits possibles de la pompe

d) Puissance de la pompe

On indiquera respectivement les grandeurs suivantes :

- puissance hydraulique,
- puissance absorbée (aussi appelée puissance de la pompe),
- puissance du moteur,
- rendement du moteur.

- **Puissance hydraulique (\bar{W}_H)**

$$\bar{W}_H = \rho \cdot g \cdot q_v \cdot H_{mt}. \quad (4.21)$$

Avec,

ρ : masse volumique de l'eau à la température de pompage en kg/m^3

q_v : débit en m^3/s

H_{mt} : hauteur manométrique en m

\bar{W}_H : Puissance hydraulique en W

- **Puissance absorbée (\bar{W}_{ABS})**

$$\bar{W}_{ABS} = \frac{\bar{W}_H}{\eta_p} \quad (4.22)$$

Avec,

η_p : rendement hydraulique de la pompe (aussi appelé efficacité de la pompe)

Si viscosité < 20 Cst, $\eta_p = f(Q_m, H_{mt})$

Si viscosité ≥ 20 Cst, $\eta_p = f(Q_m)$.

Au niveau de la puissance absorbée de la pompe il faut indiquer la puissance absorbée maxi et la puissance absorbée normale ($\bar{W}_{ABS \text{ norm}}$).

\bar{W}_{ABS} est calculée avec Q_{nominal} .

$\bar{W}_{ABS \text{ maxi}}$ est calculée avec Q_{maxi} ($Q_{\text{maxi}} = Q_{\text{calcul}}$).

- **Puissance du moteur**

La puissance du moteur est fonction de la puissance de la pompe : $\bar{W}_M = f(\bar{W}_{ABS})$

$$\bar{W}_{ABS} \text{ (CV)} = \frac{\bar{W}_H}{735} \quad (4.23)$$

Avec,

\bar{W}_H : Puissance hydraulique en W

La puissance du moteur est fonction du pourcentage d'utilisation du moteur. Le pourcentage d'utilisation du moteur est le rapport de la puissance à fournir à la puissance du moteur (pourcentage d'utilisation = 100%).

e) Rendement effectif

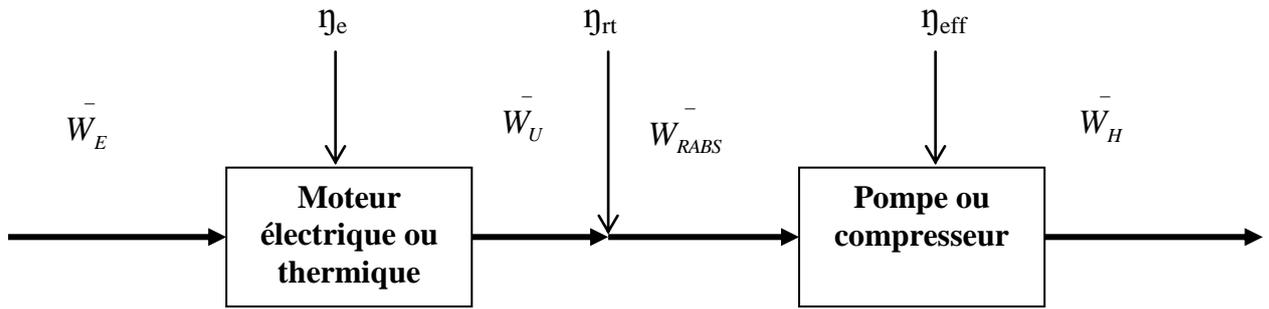


Figure4.8 : Principe de rendement global d'un couplage moteur électrique-pompe

Le rendement η_{eff} effectif d'une pompe s'exprime par la relation suivante :

$$\eta_{eff} = \frac{\bar{W}_H}{\bar{W}_{RABS}} = \frac{\rho g H_{mt} Q_v}{\Theta \omega} \quad \text{avec} \quad \omega = \frac{\pi N}{30} \quad \text{en rad/s} \quad (4.24)$$

Avec ,

\bar{W}_{RABS} : Puissance réelle absorbée par la pompe en W

Θ : Couple sur l'arbre en N.m

ω : vitesse angulaire en rad/s ; N : vitesse de rotation en tr/min.

Le rendement de la pompe est influencé par les imperfections dues au moteur électrique. Le rendement global de l'installation est donc :

$$\eta_g = \eta_{eff} \eta_{tr} \eta_{el} \quad (4.25)$$

Avec,

\bar{W}_E : Puissance électrique absorbée par le moteur (W)

\bar{W}_U : Puissance utile du moteur (W)

\bar{W}_{RABS} : Puissance réelle absorbée par la pompe (W)

\bar{W}_H : Puissance hydraulique (W).

η_{el} = rendement électrique ; η_{tr} = rendement de transmission ; η_{eff} = rendement effectif de la pompe ; η_g = rendement global.

f) Choix de la pompe.

- **Type de pompe**

Le choix du type de pompe se détermine avec l'abaque de la figure 4.7 en fonction de la vitesse spécifique (n_s). La vitesse spécifique (n_s) est fonction du débit volumique q_v (en m^3/s), de la hauteur manométrique totale H_{mt} (en m) et de la vitesse de rotation N (en tr/s). Elle est donnée par la relation :

$$n_s = N \frac{q_v^{0.5}}{H_{mt}^{0.75}} \quad (4.26)$$

Connaissant n_s , à l'aide de l'abaque, on détermine le type de pompe.

- **Rayon de la roue : $R = f(\Lambda, \Omega)$**

Ω : coefficient de vitesse angulaire donnée par la formule :

$$\Omega = \omega \cdot \frac{q_v^{0.5}}{(g \cdot H_{mt})^{0.75}} = \frac{\delta^{0.5}}{\mu^{0.75}} \quad \text{avec} \quad \omega = 2 \pi N \text{ en rad/s} \quad (4.27)$$

μ = coefficient de débit ou débit spécifique

δ = coefficient manométrique ou hauteur spécifique.

Et Λ , coefficient de rayon spécifique est déterminé graphiquement sur le diagramme de CORDIER. Le rayon R de la roue est donné par la formule :

$$R = \frac{\Lambda \cdot q_v^{0.5}}{(g H_{mt})^{0.75}} \quad (4.28)$$

.../...

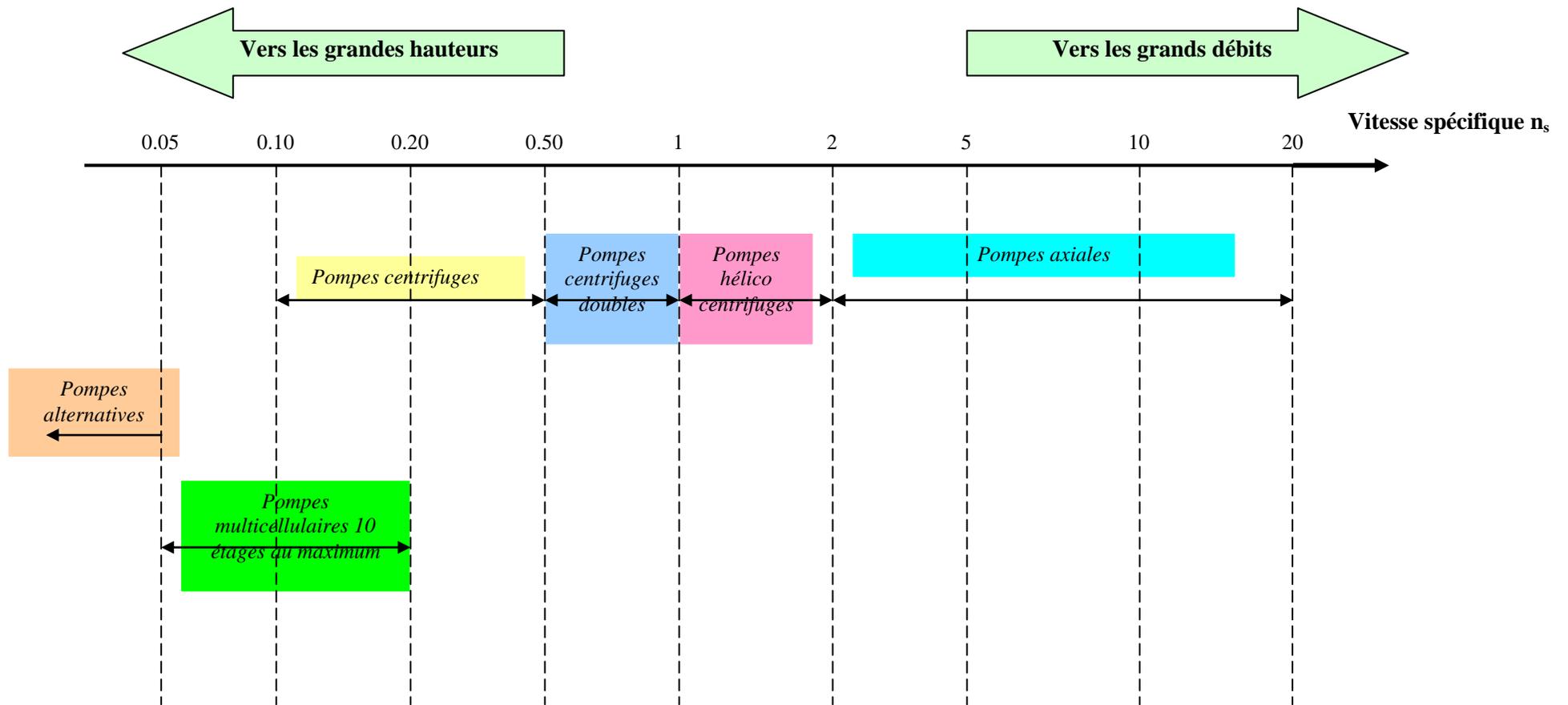


Figure 4.9 : Abaque des types de pompes en fonction de la vitesse spécifique

IV.2 ANALYSE ECONOMIQUE ET CHOIX DU PROCEDE DE TRAITEMENT

L'étude économique d'un projet thermique prend en compte de nombreux critères économiques assez complexes. Les principaux sont :

- L'investissement initial ;
- La durée d'amortissement ;
- Les frais de combustible
- Les frais de charges récurrentes ou de fonctionnement;
- Le transport.

Considérons :

- C_{PEA} : la performance énergétique actualisée ;
- C_{DIO} : les dépenses d'investissement de l'opération envisagée ;
- C_{AA} : les charges annuelles actualisées comprenant celles d'exploitation avec les impôts ; les renouvellements et les entretiens.

L'enrichissement en valeur de capital apporté par le projet est donné par la formule suivante:

$$E_{VC} = C_{PEA} - (C_{DIO} + C_{AA}) \quad (4.29)$$

Un enrichissement nul ($E_{VC} = 0$) correspond théoriquement à une opération pour laquelle les capitaux investis ont une rentabilité juste égale au taux d'actualisation choisi dans les calculs. Les différentes valeurs (C_{PEA} , C_{DIO} et C_{AA}) varient en fonction du taux d'actualisation. [3] En économie générale le critère de taux de rentabilité interne (TRI) est déterminée par :

$$\sum_1^n \frac{B_t}{(1+a)^t} - C_0 = 0 \quad (4.30)$$

C_0 : coût initial du projet ; B_t : bénéfice net généré par le projet à la date t ; n : durée du projet ; $a = TRI$.

Dans le cadre d'une étude purement énergétique, sans tenir compte des critères sociaux, on utilisera une autre valeur économique qui est le coefficient ϵ , variant bien entendu en fonction du taux d'actualisation. Il est donné par la formule suivante :

$$\epsilon = 1 + \frac{E_{VC}}{C_{DIO}} \quad (4.31)$$

Une bonne opération financière thermique, par définition, équivaut à $\epsilon > 1$. Cette méthode sert au choix des aménagements à engager ; elle est également applicable au dimensionnement de l'installation projetée. Pour $\epsilon < 1$, on dira que l'opération n'est pas rentable et rentable pour $\epsilon > 1$.

IV.2.1 ANALYSE DES COUTS ET DES AVANTAGES DE L'ADDITION DE L'ANTITARTRE ET L'ADOUCCISSEMENT.

Il y existe trois méthodes couramment employées pour contrôler le tartre:

- l'acidification
- l'addition d'antitartre
- l'adoucissement par échange d'ions

IV.2.1.1 Acidification

L'addition d'acide détruit les ions carbonates, éliminant un des réactifs nécessaires pour la précipitation du carbonate de calcium. Ceci est très efficace pour empêcher la précipitation du carbonate de calcium, mais inefficace pour empêcher les autres types de tartres.

L'addition d'acide n'est pas très rentable en raison du coût d'acide, de réservoirs et d'équipements de surveillance et la corrosivité de l'acide. A moins de l'éliminer par dégazage, l'excès de dioxyde de carbone contenu dans le perméat, les systèmes d'alimentation d'acide augmentent le coût de la régénération de l'échangeur d'ions.

IV.2.1.2 Addition d'Antitartres

Ce sont des matériaux de tensioactifs qui interfèrent avec les réactions de précipitation selon trois voies principales qui sont l'inhibition d'effet de seuil, la modification cristalline et la dispersion. (LENTECH, 2005). Les antitartres sont des produits relativement peu coûteux et n'ont pas de coûts additionnels.

Le tableau 4.1 présente les évolutions des coûts (frais d'exploitation ; dépenses d'équipements et investissement) correspondant aux traitements par antitartre pour différents niveaux de dureté ; sur la base d'une production de 17 m³/h de perméat à un taux de recouvrement de 75%.

Tableau 4.1 : Coûts de l'addition d'antitartres

Dureté (ppm)	Performance C _{PEA} (10 ³ \$US)	Equipements C _{DIO} (10 ³ \$US)	Exploitation C _{AA} (10 ³ US)	Enrichissement E _{VC} (10 ³ \$US)	Valeur économique €
10	7,1671	2	1,3x5	-1,33329	0,3334
20	7,1671	2	1,3x5	-1,33329	0,3334
50	7,1671	2	1,3x5	-1,33329	0,3334
100	7,1671	2	1,3x5	-1,33329	0,3334
250	8,352	2	1,6x5	-1,648	0,176

Au regard des résultats d'analyse, $\epsilon < 1$ dans tous les cas, ce qui nous amène à dire qu'on est en présence d'une mauvaise opération financière thermique. Car il faudra 11 ans pour amortir l'investissement au lieu de 5 ans.

IV.2.1.3 Adoucissement par échange d'ions

Cette méthode utilise le sodium qui s'échangera avec les ions magnésium et calcium, concentrés dans l'eau d'alimentation. Les équations chimiques de cet échange sont les suivantes:



(NaZ représente la résine d'échange de sodium).

Lorsque tous les ions sodium ont été remplacés par des ions calcium et magnésium, la résine doit être régénérée avec une solution saumure. L'adoucissement par échange d'ions évite le besoin continu d'acide et d'antitartre dans l'alimentation.

En se référant aux formules 4.28 et 4.30 ; l'étude économique des différents niveaux d'investissement donne les résultats consignés dans le tableau 4.2.

Ici on considère que :

C_{PEA} : performance économique de la production annuelle d'eau attendue;

C_{DIO} : dépense d'investissement des équipements d'installation de traitement d'eau

C_{AA} : frais d'exploitation du traitement d'eau.

On considère deux colonnes de résines de traitement d'un volume de 1,2 m³ chacune et la période d'amortissement est de sept(7) ans avec un taux d'intérêt de 8%.

En le comparant aux traitements par acide ou par antitartre, le principal désavantage de l'adoucissement se trouve dans les frais d'équipement. A travers différentes analyses, il n'y a pas de niveau de dureté pour lequel l'adoucissement est plus économique que l'addition d'antitartres.

Tableau 4.2 : Coûts de l'adoucissement

Dureté (ppm)	Performance C_{PEA} (10³ \$US)	Equipements C_{DIO} (10³ \$US)	Exploitation C_{AA} (10³ US)	Enrichissement E_{VC} (10³ \$US)	Valeur économique €
10	39,70	20	1,906x7	6,358	1,3179
20	35,133	20	3,1812x5	5,5894	1,27947
50	108,968	40	9,53x7	2,258	1,05645
100	160,585	40	23,825x7	1,46	1,0365
250	283,725	40	34,28x7	3,725	1,093125

Tout comme l'antitartre, $E > 1$. Dans tous les cas de figures, malgré les coûts additionnels de prétraitement, l'utilisation des eaux polluées dans une chaufferie ne rend pas caduque le projet d'investissement. Mais seulement la période d'amortissement est rallongée de deux années supplémentaire (soit de 5ans à 7ans).

IV.2.2 COMPARAISON DES QUALITES DE PRODUCTION DES EAUX ISSUES

DES DIFFERENTS PROCEDES

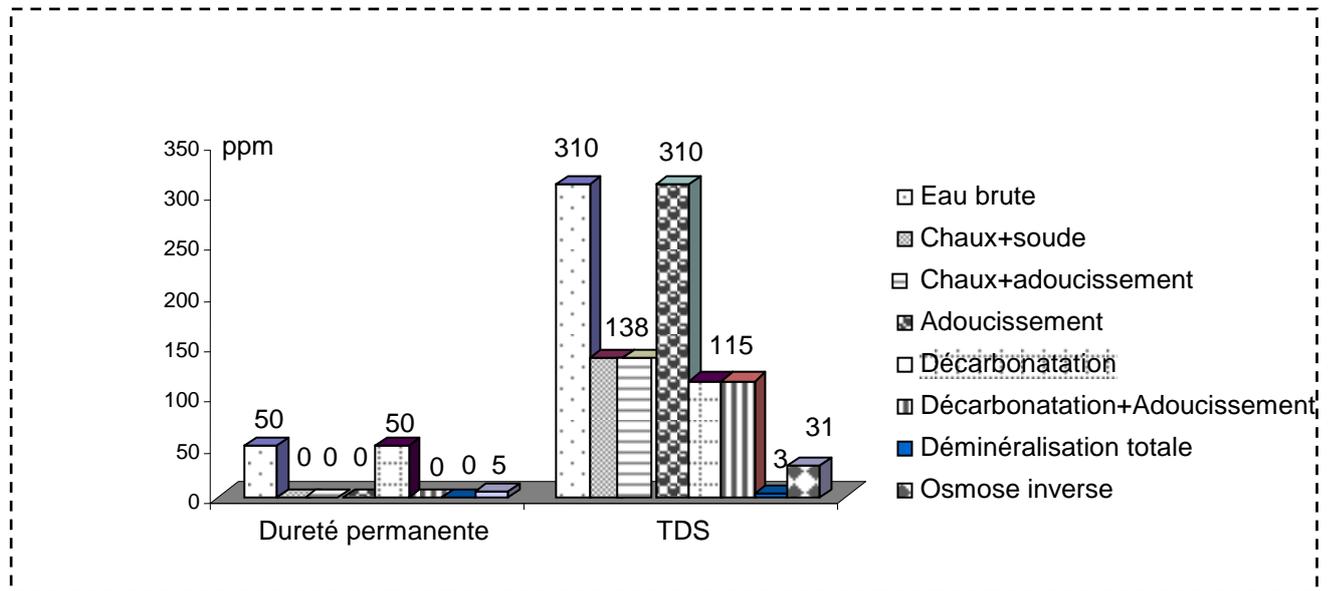


Figure 4.10: Efficacité des Procédés

La figure 4.10 présente une étude comparée des qualités des eaux au sortir de différents systèmes de traitement. La teneur en sels dissous dans l'eau traitée, varie d'un procédé à un autre. La dureté de l'eau est quasiment éliminée après le passage de l'eau par le système de déminéralisation totale. Tandis que seule la moitié de la dureté est éliminée par le traitement à la chaux ou par la combinaison chaux/adoucissement.

Cependant tous les traitements réduisent considérablement voire éliminent totalement la dureté permanente.

IV.2.3 ANALYSE DES COÛTS RELATIFS DE FONCTIONNEMENT ET

D'INVESTISSEMENT DES PROCEDES

Sur le marché national industriel ou dans les Petites et Moyennes Industries (PMI), l'addition d'antitartre, l'adoucissement, la décarbonatation-adoucissement et la déminéralisation sont les plus utilisés. Nous avons donc estimé les coûts d'investissement et de fonctionnement engendrés par ces systèmes. Avant toute chose, précisons que nous appelons coûts d'investissement les coûts de toutes les machines et équipements qui entrent dans le cadre de l'implantation de l'unité de traitement ; et par coûts de fonctionnement, les coûts liés à l'achat des produits chimiques de traitement et à la marche de l'unité.

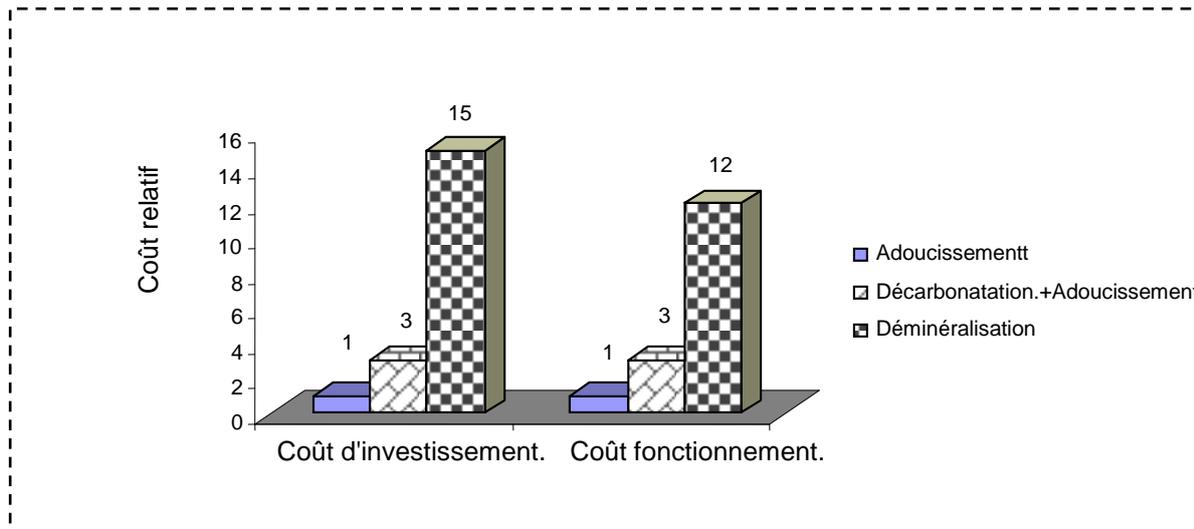


Figure4.11: Coûts relatifs d'investissement et de fonctionnement de trois procédés

L'étude des coûts d'investissement et de fonctionnement que nous présentons ici prend comme référence l'adoucissement en raison de son utilisation préférentielle dans la plupart des unités de traitement de capacité moyennes, l'addition d'antitartre étant considérée comme un traitement interne. Nous prendrons donc pour unité, l'investissement et le fonctionnement de l'adoucissement et nous évaluerons les autres en fonction du premier. Comme les prix de revient sur le marché international subissent les fluctuations internationales, il n'est pas approprié d'étudier directement les coûts directs qui ne sont pas fixes.

L'histogramme de la fig4.11 présente un faible coût d'investissement et de fonctionnement pour l'adoucissement ($C_{ri} = 1$ et $C_{rf} = 1$). Ce coût est multiplié par trois (3) lorsqu'il s'agit de la décarbonatation-adoucissement ($C_{ri} = C_{rf} = 3$). Le procédé le plus coûteux reste et demeure la déminéralisation totale ($C_{ri} = 15$) et ($C_{rf} = 12$).

IV.2.4 ANALYSE DES COUTS RELATIFS DES TRAITEMENTS DU LAC5 ET DE L'EAU DE SODECI PAR TROIS PROCEDES.

Cette partie de l'étude sera faite sur le lac en raison de son bassin versant cumulée élevée (km^2). Ce lac constitue le carrefour des branches d'écoulement.

Cette autre évaluation du lac 5 par rapport à l'eau de SODECI (eau potable commercialisée) est purement expérimentale. Elle a été effectuée au sein des entreprises disposant de petites ou moyennes unités de traitement utilisant les eaux brutes de qualité voisines de celle du lac5 et de la SODECI. L'observation des trois (3) histogrammes (figure.4.12, figure.4.13 et

figure.4.14 nous indique que le coût de fonctionnement, dans le cadre du traitement de l'eau de SODECI, est largement au dessus du coût d'investissement de cette même eau. Ceci s'explique par le fait que l'eau de SODECI est commerciale et engendre un coût additionnel (prix d'achat de l'eau) sur le coût de fonctionnement.

En revanche l'eau du lac5, de part sa gratuité, n'occasionne que de faibles coûts additionnels de fonctionnement, une fois les investissements sont faits. Ce qui justifie le faible coût relatif de fonctionnement par rapport au coût d'investissement.

Vu la disponibilité des eaux des lacs de la région (YABRA, KOSSOU....) et la cherté de l'eau commerciale, nous pensons donc que les chaufferies peuvent amortir, à court ou à moyen terme, les surcoûts d'investissement et devenir rentables.

Au regard des estimations faites, les coûts d'investissement est élevé et de fonctionnement faible pour le lac5 en ce qui concerne la décarbonatation/adoucissement (figure4.12). Par contre le coût d'investissement est faible dans le cas de l'eau commerciale (SODECI). Cette différence a deux origines essentielles :

D'abord, l'utilisation de l'eau de SODECI ne demande pas l'implantation d'équipements de prétraitement ; ce qui réduit de facto le coût d'investissement. En suite, l'eau étant commerciale, le coût de fonctionnement subit une hausse supplémentaire (coût du cubage).

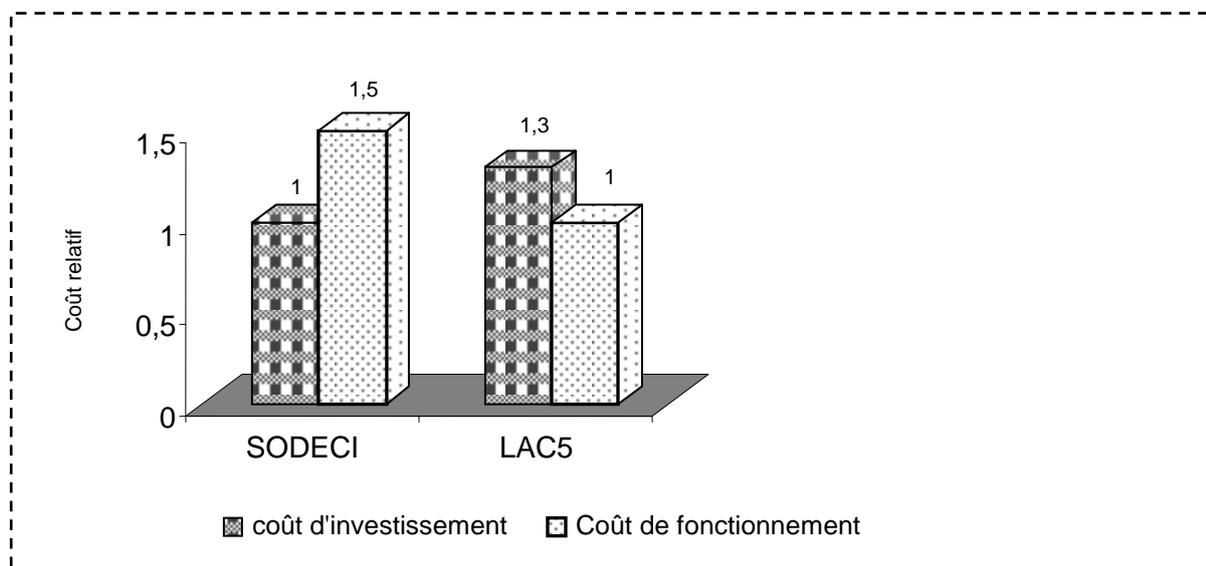


Figure4.12: Coûts de décarbonatation-adoucissement des eaux du lac5 et de SODECI

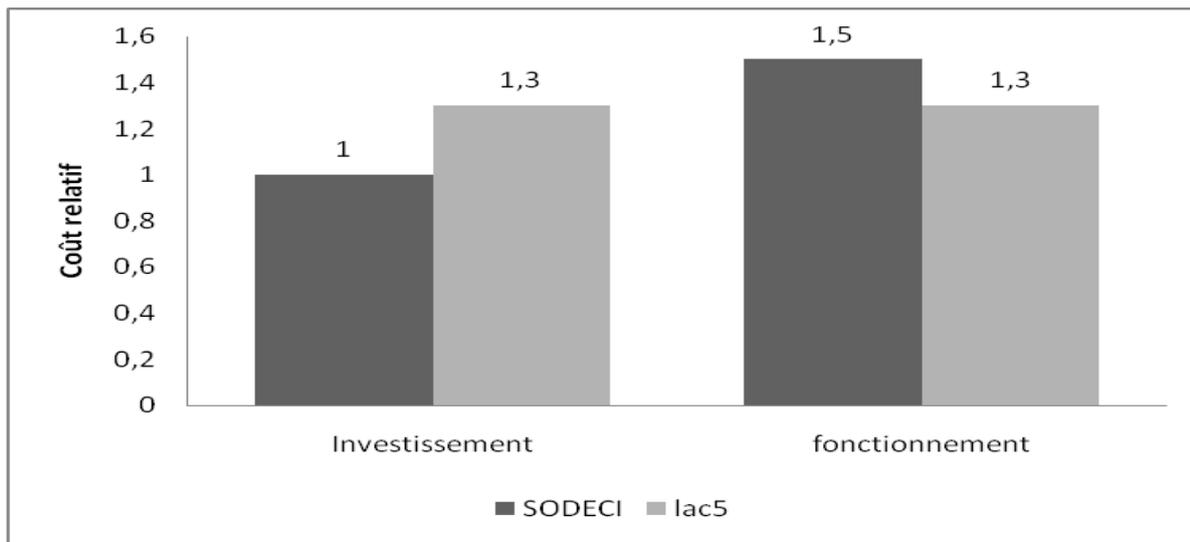


Figure 4.13 : Coût d'adoucissement des eaux du lac5 et de SODECI

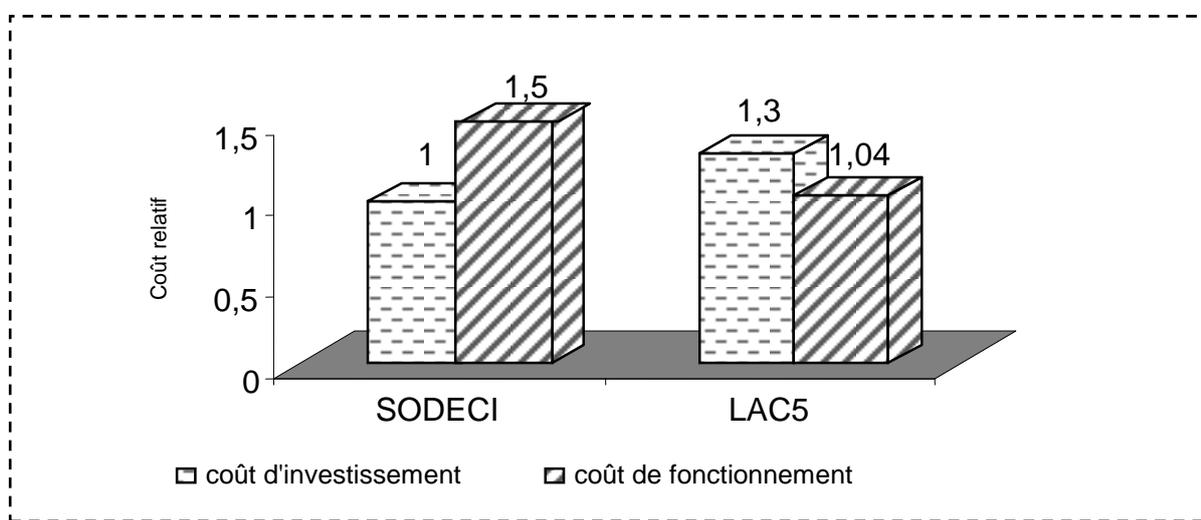


Figure4.14: Coût de déminéralisation des eaux du lac5 et de SODECI

Pour ce qui est du lac5, le coût supplémentaire des équipements de prétraitement (dégrillage, dessablage, filtration, déferrisation...) et la gratuité de l'eau établissent un équilibre entre coût de fonctionnement et d'investissement.

La figure4.14 relative au coût de déminéralisation totale des eaux présente deux situations diamétralement opposées. L'utilisation de l'eau commerciale exige un investissement relativement faible par rapport à celui du lac5. Cet écart est toujours justifié par l'existence d'un circuit de prétraitement pour le lac5.

Comme dans le cadre de la figure4.12, le coût additionnel de l'eau et l'absence de circuit de prétraitement sont à l'origine de l'écart entre coût de fonctionnement et coût d'investissement pour l'eau de SODECI.

Par contre, le coût d'investissement est supérieur au coût de fonctionnement au niveau du lac5. Étant donné que l'eau du lac est gratuite, les coûts de fonctionnement sont réduits par rapport à l'eau de SODECI.

En somme, des avantages notables sont à prendre en compte quant à l'utilisation des eaux polluées des lacs de la ville de Yamoussoukro dans une installation de chaufferie industrielle. Il s'agit notamment :

- de la gratuité, de l'abondance et de la disponibilité de l'eau (lac11; 12 ; 17 et 18)
- des coûts de fonctionnement relativement faibles par rapport à l'utilisation des eaux commerciales.
- La faible minéralisation des lacs (moy = 210µS/cm)
- La proximité avec les populations consommatrices.

Ces avantages n'occulent pas la présence d'inconvénients qu'il faut souligner. Les lacs périurbains de la ville de Yamoussoukro sont, avant tout, des lacs touristiques (lac1 à 10 et 13 à 16) ; or la présence d'unité industrielle peut être source de pollution et ou de tarissement.

De plus, la nature périurbaine de certains d'entre eux engendre des surcoûts d'investissement pour les installations de traitement. C'est pourquoi il est préférable d'opter pour les lacs 11 ; 12 ; 17 et 18 qui sont abondants et plus ou moins éloignés de la ville.

IV.3 EVALUATION ECONOMIQUE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

L'évaluation économique se justifie aux niveaux microéconomique et macroéconomique.

Au niveau microéconomique, l'évaluation économique des impacts environnementaux permettra aux opérateurs économiques d'internaliser les externalités c'est-à-dire de prendre en compte les effets externes dans leurs calculs économiques. A ce niveau l'évaluation économique revêt deux intérêts essentiels :

IV.3.1 LE PRINCIPE DE RATIONALITE ECONOMIQUE

La prise en compte des dommages dans les calculs économiques permettra une gestion économique efficace des ressources naturelles c'est-à-dire aboutira à un maximum de bien-être au sens de PARETO. On évitera ainsi une utilisation irrationnelle des ressources en eaux

et on minimisera le coût total des dommages l'optimum marginal des dommages est égal au coût marginal des actions de lutte contre les causes de ces dommages.

$$C_{em} = \frac{\Delta C_{TD}}{\Delta dom} \text{ et } C_m = f'_d = \frac{d(C_{TD})}{d(dom)} \quad (4.34)$$

C_{TD} : coût total des dommages (unité monétaire)

C_{em} : coût marginal des externalités (unités monétaire)

C_m : coût marginal des actions (unité monétaire)

dom : dommages (unité monétaire)

Le problème réside dans la connaissance des fonctions de coûts des dommages.

IV.3.2 LE PRINCIPE DE COMPARAISON DES COUTS ET DES AVANTAGES

L'hétérogénéité des dommages issus des phénomènes de dégradations de l'environnement rend difficile la détermination d'une fonction de coût des dommages.

Au niveau macroéconomique l'évaluation économique des dommages environnementaux se justifie à plusieurs titres :

- elle permettra la réalisation de projets de développement ayant pris en compte les avantages et les coûts sociaux liés aux impacts environnementaux.
- Permettra aux décideurs politiques de décider en connaissance de cause avec des données chiffrées.
- Permettra de corriger les agrégats macroéconomiques tel que le PIB (produits intérieur brute).
- Permettra la mise en place d'une comptabilité verte au compte du patrimoine naturel.

IV.4 EXPLOITATION DE L'EAU DU LAC5

IV.4.1 POUR LE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE THERMIQUE

Thème : Soit une chaudière destinée à produire de la vapeur saturée (pression 3MPa et température 350°C) à partir de l'eau brute du lac5 de la ville de Yamoussoukro pour des besoins d'une centrale thermique.

Travail demandé : proposer un traitement de l'eau du lac et dimensionner la chaufferie par :

- Le calcul de la puissance utile et le rendement thermique de l'installation et la puissance que doit fournir la chaudière et son rendement thermique.
- Le choix du type de chaudière
- Le dimensionnement la bêche alimentaire
- Le dimensionnement de la pompe alimentaire
- Dimensionnement des tuyauteries de conduite d'eau et vapeur installation de la chaufferie

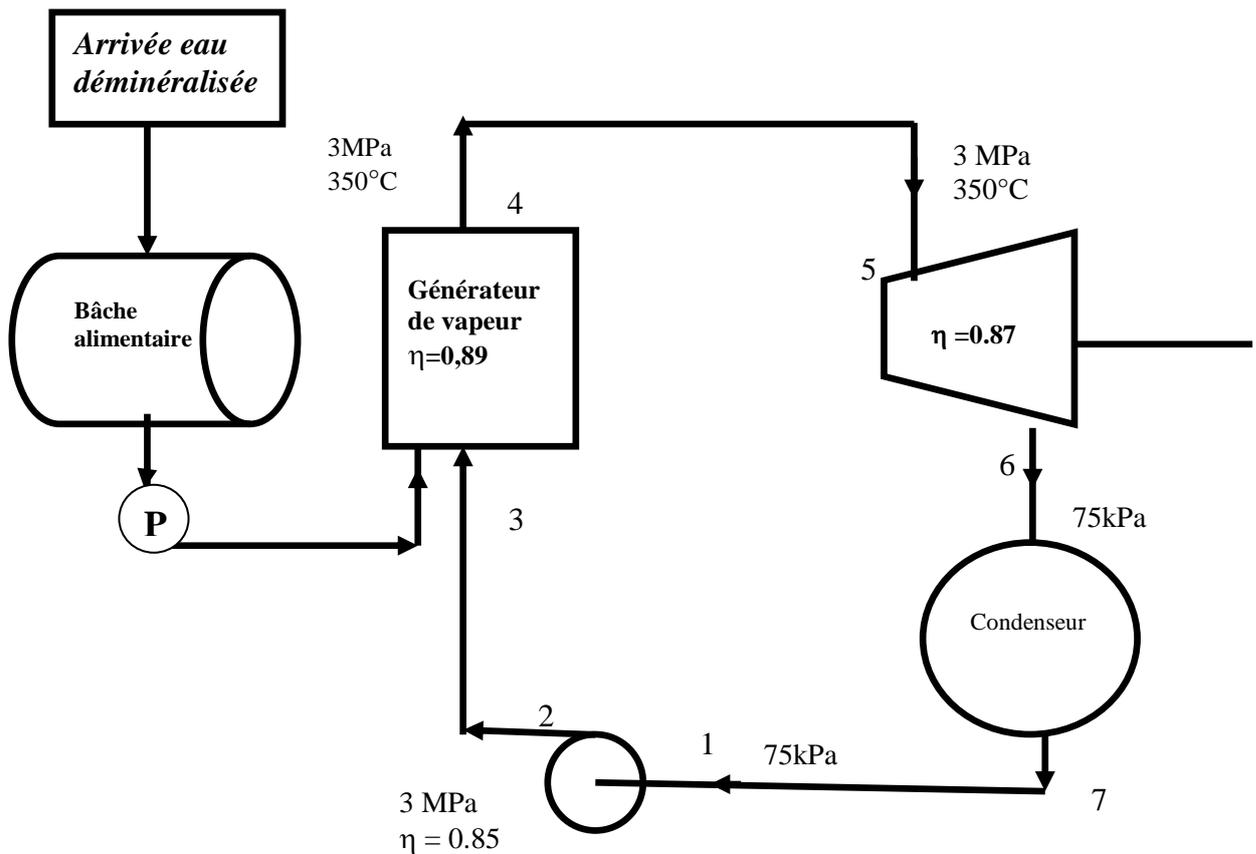


Figure4.15 : Installation d'une centrale thermique

.../...

IV.4.1.1 Caractéristiques détaillées de l'eau du lac5

Tableau 4.3 : Fiche d'analyse du lac5

FICHE D'ANALYSE D'ECHANTILLON D'EAU

Origine : ville de Yamoussoukro (lac5).

Nature : Eau de lac

date : 29/12/2006.

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Couleur et odeur : *trouble et inodore.*

Dépôt : 38 mg/L (MES)

Turbidité : 38.4 NTU.

Résistivité à 27°C : 3472 Ω/cm.

Conductivité à 27°C : 288µS/cm.

pH à 27°C : 7.41.

ANALYSE CHIMIQUE DE L'EAU FILTREE

degrés		degrés			
français		français			
Dureté totale (TH) :	9.2	Alcalinité libre :	0		
Dureté carbonatée :	9.2	Titre alcalimétrique (TA) :	0		
Dureté permanente :	0	Titre alcalimétrique complet (TAC) :	12.4		
Dureté calcique (TCa) :	6.9	Sels d'acides forts (SAF) :	5.5		
Dureté magnésienne (TMg) :	2.3	Salinité totale :	46.7		
Matière organique (KMnO ₄) :6.41mgO ₂ /L					
ANIONS	mg/L	méq/L	CATIONS	mg/L	méq/L
Chlorures Cl ⁻ :	20.3	.57	Calcium Ca ⁺⁺	28	1.4
Sulfates SO ₄ ²⁻	21.1	0.44	Magnesium		
Nitrates NO ₃ ⁻	0.18	-	Mg ⁺⁺	5.36	0.44
Bicarbonates			Sodium Na ⁺	66.78	2.9
HCO ₃ ⁻	92.3	2.48	Potassium K ⁺	42.66	1.1
Total :	133.9	3.5	Total	142.8	5.84

IV.4.1.2 Prétraitement de l'eau du lac 5

a) Prétraitement mécanique

L'eau de lac doit subir avant son traitement proprement dit, un prétraitement qui comporte un certain nombre d'opérations, uniquement physiques ou mécaniques. Il est destiné à extraire de l'eau du lac la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature ou la dimension constituerait un gêne pour les traitements ultérieurs.

Selon l'importance et la qualité de l'eau de lac, le prétraitement mécanique sera constitué des opérations suivantes :

- **Dégrillage**

Le dégrillage est une opération du prétraitement qui permet de protéger la station contre l'arrivée intempestive de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation; de séparer et d'évacuer facilement les matières volumineuses charriées par l'eau brute, qui pourrait nuire à l'efficacité des traitements suivants ou en compliquer l'exécution.

- **Dessablage**

Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes les graviers, le sable et les particules minérales plus ou moins fines, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et les conduites; de protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion, d'éviter de surcharger les stades de traitement suivants.

- **Débouage**

Le débouage est une opération qui précède la clarification des eaux de surfaces particulièrement chargées. Il constitue une prédécantation dont le but est d'éliminer la totalité des sables fins et le plus possible des limons.

- **Tamissage**

Le tamissage est une filtration sur support mince, utilisable dans de nombreux domaines du traitement de l'eau. Suivant la dimension des orifices de passage du support on distingue deux variantes :

- ✓ Le **macro tamissage** est destiné à retenir certaines matières en suspension, flottantes ou semi flottante, débris végétaux ou animaux, insectes, brindilles, algues, herbes, etc. ..., de dimensions comprises entre 0,2 mm et quelques millimètres,
- ✓ Le **micro tamissage** retient les matières en suspension de très petites dimensions contenues dans les eaux de consommation ou dans les eaux résiduaires prétraitées.

Après le prétraitement mécanique, il est nécessaire de procéder au prétraitement physico-chimique.

b) Schéma de prétraitement physico-chimique

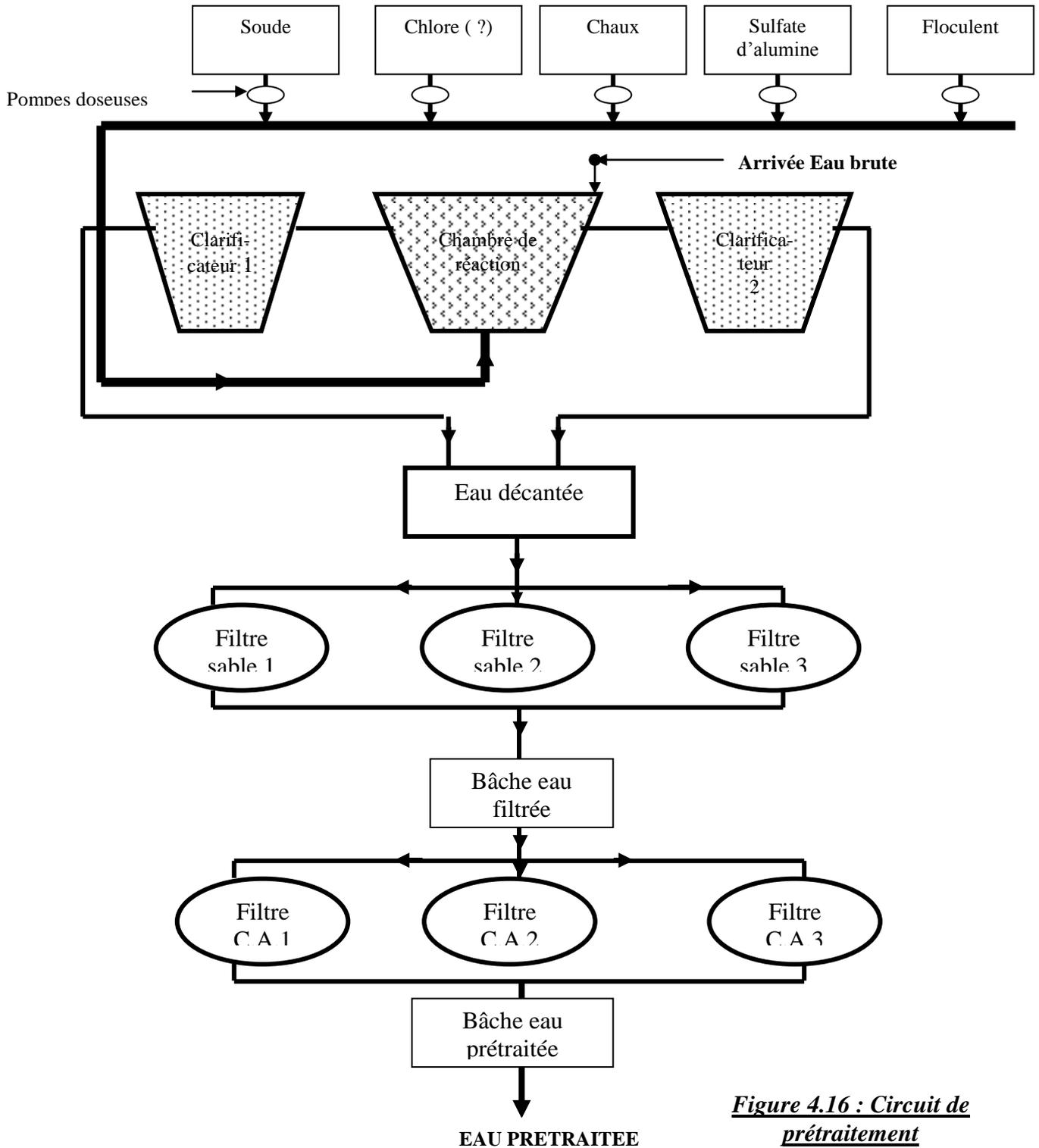


Figure 4.16 : Circuit de prétraitement

Tableau 4.4 : Caractéristiques colloïdales des lacs 1 et 5 avant et après prétraitement

	Normes chaudières			Avant prétraitement		Après prétraitement	
	69 bars	35 bars	18 bars	Lac1	Lac 5	Lac1	Lac 5
NTU	0	0	0	6.45	38.40	0	0
MES (mg/L)	0	0	0	10.00	28.00	0	0

IV.4.1.3 Traitement de l'eau du lac 5

- Le débit supposé d'eau traité est de $Q_v = 20 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Selon les normes de la chaudière (pression de service 25bars), et les caractéristiques de l'eau des lacs ($TAC > TH$), le type de traitement adapté est l'adoucissement suivi de la décarbonatation.

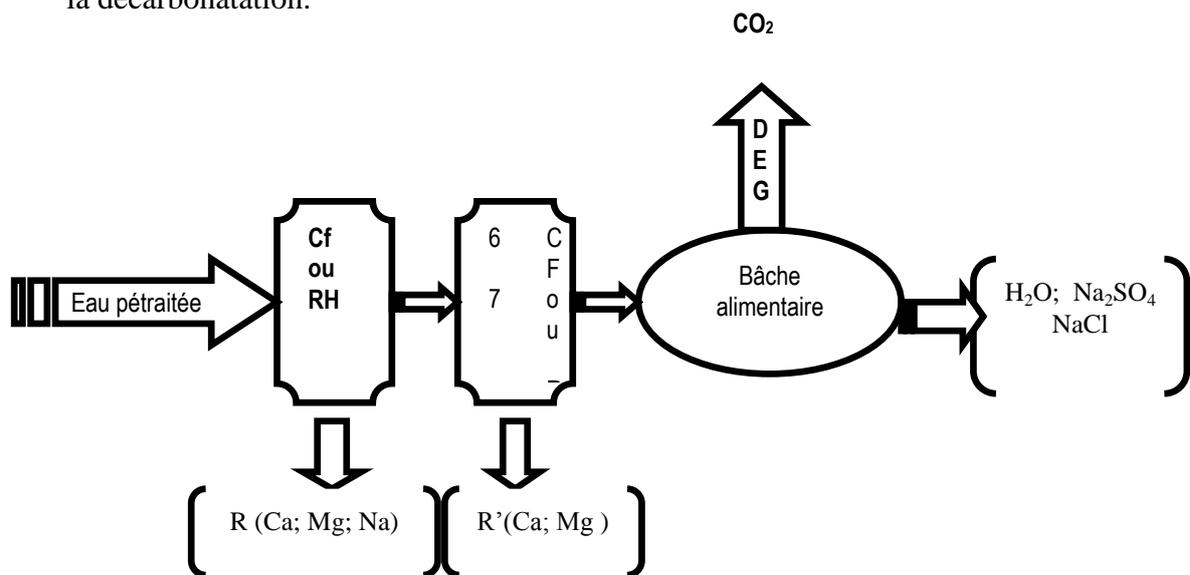


Fig4.17 : Schéma de déminéralisation de l'eau du lac5

c) Calcul du volume des résines

Un litre de résine/heure pour pouvoir garantir la capacité d'échange. Le volume de résine dépend du débit maximum de production sur la vitesse spatiale.

Tableau 4.5 : Volume des résines

Résine cationique	Vitesse spatiale	Volume
Résine carboxylique (Cf ou RH)	60L d'eau/L de résine/heure	333.34 L
Résine sulfonique (CF ou RNa)	36L d'eau/L de résine / heure	556 L

d) Calcul de la capacité des résines

Soit M_C la minéralisation cationique de l'eau du lac et V_{ppc} la possibilité de production du cation :

$$V_{ppc} = \frac{5228.8}{M_C} = \frac{5228.8}{25,56} = 204,56 \text{ m}^3$$

Pour éviter la saturation de la résine avant la fin du cycle de la chaîne, celui-ci est ramené à 85% de sa capacité de production. Soit $\Gamma = 0,85V_{ppc} = 204,56 \times 0,85 = 174 \text{ m}^3$ à partir duquel la résine est supposée saturée.

Tableau 4.6 : Capacité des résines

Résine cationique	Pouvoir d'échange utile	Capacité
Résine carboxylique (Cf ou RH)	60 g de CaCO_3	$2004^\circ\text{F}/\text{m}^3$
Résine sulfonique (CF ou RNa)	58 g de CaCO_3	$3224.8^\circ\text{F}/\text{m}^3$
Capacité totale d'échange du cation		$5228.8^\circ\text{F}/\text{m}^3$

Consommation des résines

Caractéristique du régénérant : HCl à 30% ; densité : 1.17.

La consommation théorique d'acide est donnée par :

$$m_{th} = \frac{7,3 \times \Gamma \times M_C}{1000} = \frac{7,3 \times 174 \times 25,56}{1000} = 32,46 \text{ kg}$$

Γ : cycle de production en m^3

M_C : minéralisation cationique de l'eau en $^\circ\text{F}$

m_{th} : consommation théorique d'acide en kg.

m_{pr} : Consommation pratique en kg

$m_{pr} = m_{th} + 15\%m_{th} = 37,33 \text{ kg}$ d'acide non dilué.

Acide à 30% = 124,7 kg

La consommation spécifique : $M_{CSA} = 251 \text{ g}$ de HCl à 30% / m^3

Tableau 4.7 : Comparaison des paramètres physico-chimiques après traitement

	69 bars	35 bars	18 bars	Cf-CF-DEG	CF-DEG-AF
TAC (mg/L)	< 10	< 60	< 80	0.3	0
TH (mg/L)	< 0.05	< 0.2	< 0.2	0	0
pH	10-11	10.5-12	10.5-12	10-12	10-12

IV.4.1.4 Dimensionnement des organes principaux du circuit (ANNEXE 4)

Tableau 4.8 : Résultats du dimensionnement de l'installation de la centrale thermique

Organes Caractéristiques	Chaudières	Pompe	Turbine	Adoucisseur (2 colonnes)
Puissance	27.27 MW	35.7 kW	7.121 MW	174 m ³
Type	A tubes d'eau	Hélico centrifuge à 1450tr/min	-	Volume : 2x890 L
Pression de service	30 bars	Entrée : 75kPa Sortie : 30bars	Entrée : 30 bars Sortie : 75kPa	-
Débit d'eau	q _m = 10kg/s	10 kg/s	10 kg/s	Q _v = 20m ³ /h
Température	350°C	-	350°C	-
Rendement	0.89	0.85	0.87	-

IV.4.1.5 Etude économique de l'exploitation du lac 5

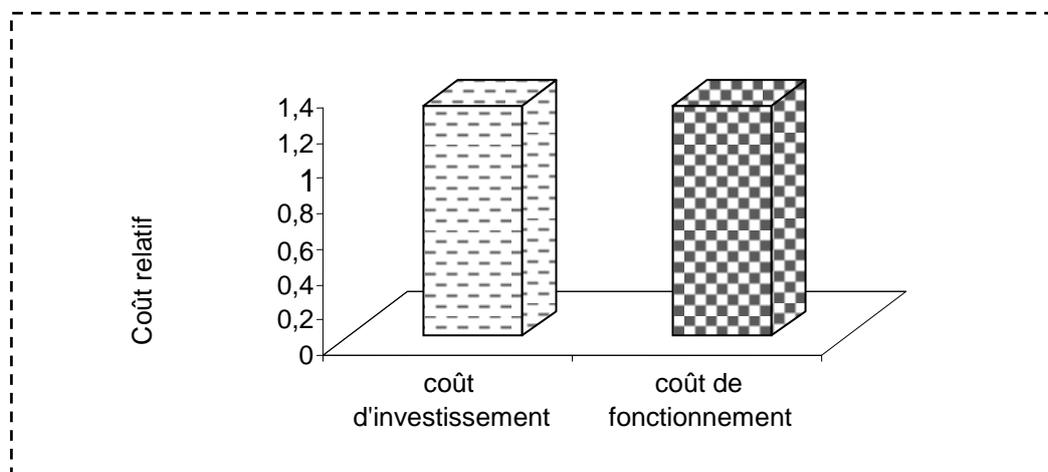


Figure4.18: Coût relatif d'adoucissement avec décarbonatation du lac5

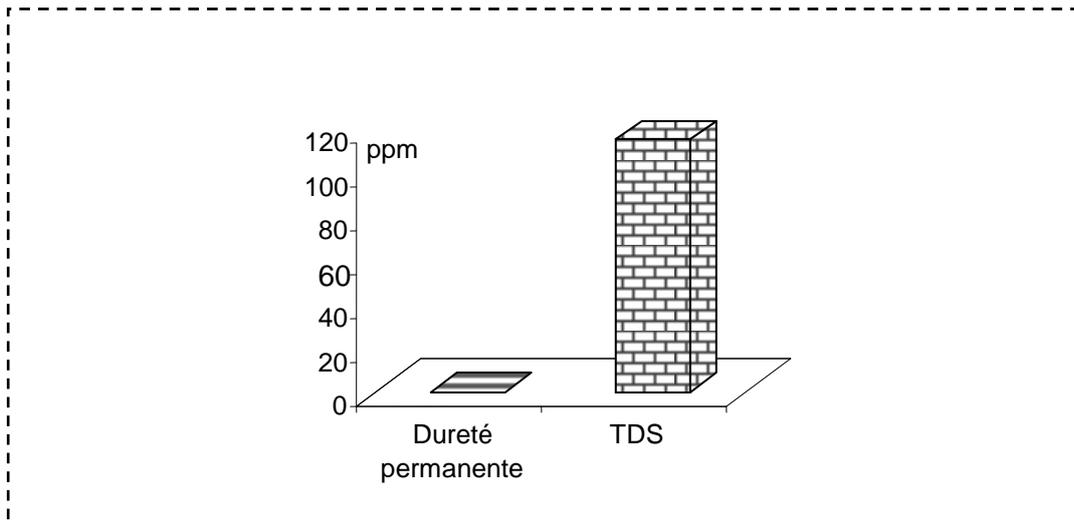


Figure4.19: Qualité de l'eau produite par adoucissement avec décarbonatation

Le lac5 présente les mêmes coûts relatifs d'investissement que de fonctionnement ($Cri = Crf = 1.4$). Il s'agit d'un lac très pollué qui nécessite un prétraitement (tableau 4.3 et figure4.17). Cependant la qualité de l'eau produite par la décarbonatation / adoucissement est bonne (TDS = 120 ppm) et une dureté permanente nulle (figure4.19).

IV.4.2 POUR DES BESOINS SANITAIRES : CAS DE L'HOPITAL DE YAMOUSSOUKRO

IV.4.2.1 Présentation du cahier de charges

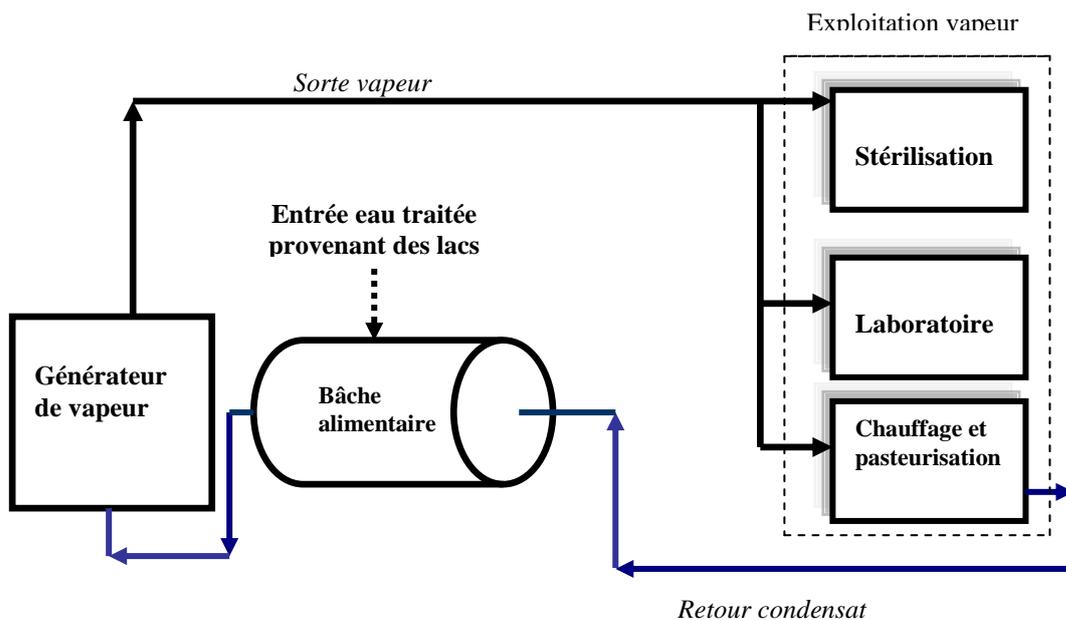


Figure4.120 : Schéma d'installation du circuit de chauffage d'eau pour hôpital

La chaudière destinée à produire de l'eau chaude à partir de l'eau de lac de Yamoussoukro préalablement traitée pour les besoins sanitaires de l'hôpital central de la dite commune. Cette chaudière servira essentiellement à chauffer l'eau contenue dans un ballon de 15m^3 de 25°C à 100°C pendant 3 heures.

Au cours de ce réchauffement, la consommation de combustible sera estimée à 146.4 Litres.

Le travail demandé pour cette étude consiste à proposer un traitement de l'eau du lac et à dimensionner la chaufferie.

IV.4.2.2 Calculs et dimensionnement des organes de l'installation (Voir ANNEXE 5)

IV.4.3 POUR DES BESOINS DE CHAUFFAGE DANS UN HOTEL : CAS HOTEL PRESIDENT

Soit une chaudière destinée à produire de la vapeur saturée à partir de l'eau de lac de Yamoussoukro préalablement traitée pour les besoins domestiques d'un hôtel. Cette chaudière servira essentiellement à chauffer l'eau d'un volume de 20m^3 de 25°C à 70°C tous les jours pendant 2heures.

IV.4.3.1 Calculs et dimensionnement des organes de l'installation (Voir ANNEXE 6)

a) Volume de la bache alimentaire (V_{BA})

$$V_{BA} = [2g(D_{bc} + \Delta P/\rho g - j)]^{0,5} \cdot t_s \cdot S \quad (4.35)$$

D_{bc} =diamètre de la bache cylindrique(m) ; ΔP : perte de charge (Pa)

t_s = temps de séjour de l'eau dans la bache alimentaire(s)

S = section du cylindre(m^2) ; j : perte de charge linéaire(m)

On prendra $D_{bc} = 1\text{m}$, $S = \pi/4 \text{ m}^2$ $j = 2\text{m}$ et $t_s = 2\text{s}$

$$V_{BA} = 10 \text{ m}^3$$

Dans notre cas de figure, la bache joue le rôle d'un groupe de maintien de pression, ce qui justifie ses grandes dimensions.

.../...

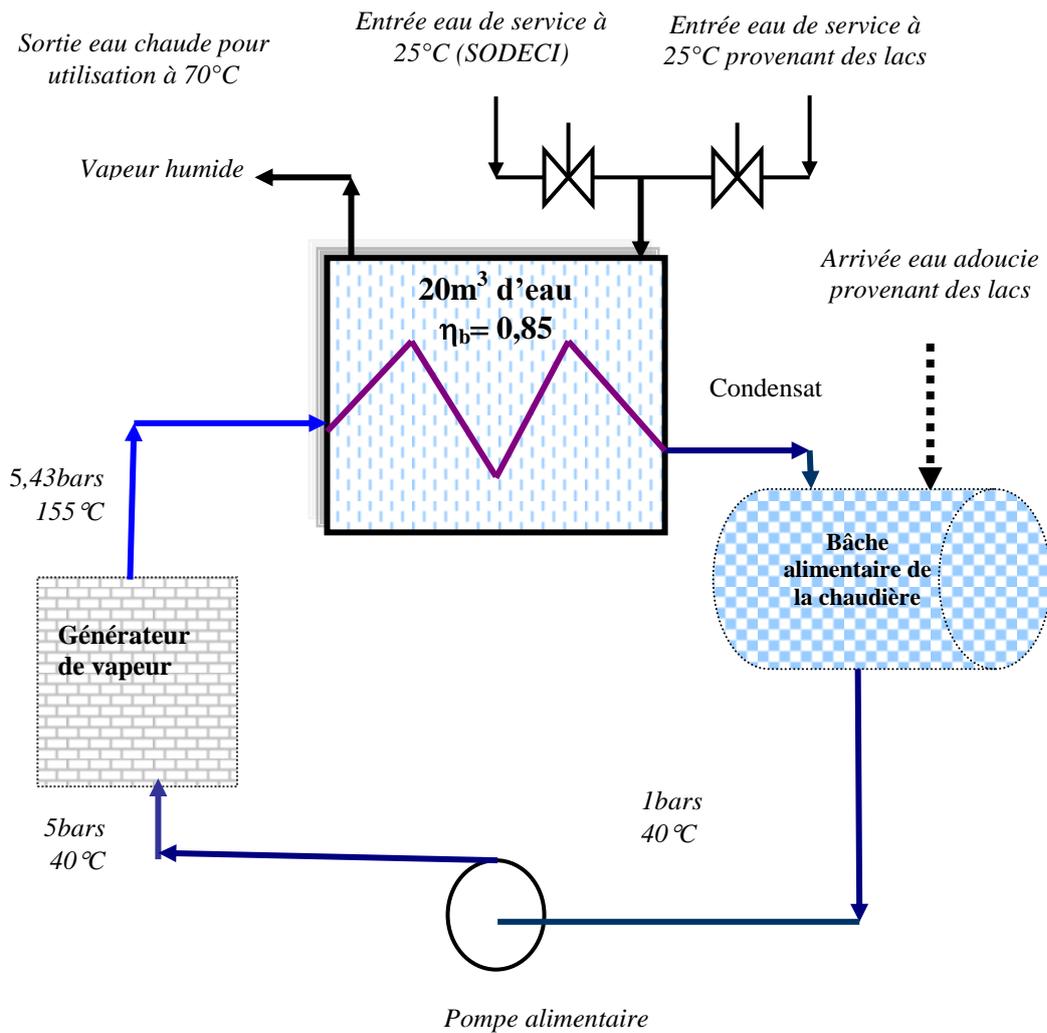


Figure4.21 : Schéma d'installation du circuit de chauffage d'eau pour hôtel

b) Choix du type de chaudière

La puissance de la chaudière est de 615.44kW et le débit massique est de 0.27kg /s, soit une production horaire de 2,86 tonnes. Une chaudière à tubes de fumées est le mieux indiquée.

Traitement de l'eau :

Vu le type de chaudière et la pression de service, on peut opter pour un adoucissement ou un traitement interne de l'eau sans occulter les opérations de prétraitements. Chacune des deux méthodes devrait pouvoir protéger la chaudière.

Tableau4.9 : Récapitulatif des Caractéristiques des trois installations

Types d'installations Caractéristiques	CENTRALE THERMIQUE	VAPEUR SANITAIRE	VAPEUR DE CHAUFFAGE HOTEL
Intervalle de chauffage (°C)	30 -350	25 - 60	25 - 100
Puissance utile installation	7.97MW	435,76kW	523,125 kW
Rendement installation	26%	96.6%	85%
Puissance utile chaudière	27.27 MW	439.27kW	615,44kW
Rendement chaudière	89%	85.33%	86%
Puissance du brûleur	30.64 MW	511,5kW	715,63kW
Type de chaudière	A Tubes d'eau	A Tubes de fumées	A Tubes de fumées
Type de pompe	Hélico centrifuge	-	Centrifuge
Puissance pompe	35.7 kW	-	125W
Type de traitement	Cf-DEG-CF	Adoucissement	Décarbonatation à la chaux
Consommation de produit chimique	0,715kg de HCl à 30% par m ³ d'eau traitée	0,715kg de HCl à 30% par m ³ d'eau traitée	1.36g de Ca(OH) ₂ par litre d'eau traitée
Volume des résines	2x890 L	1x 556 L	-
Capacité totale d'échange des résines	5228.8°F/m ³	3224.8°F/m ³	-
Débit d'eau dans le circuit vapeur (kg/min)	600	10,92	

IV.5 CONCLUSION PARTIELLE

L'étude comparée du lac5 et de l'eau de SODECI (eau commerciale) montre que l'utilisation d'une eau polluée peut être rentable par rapport à une eau commerciale. La gratuité de l'eau du lac5 ainsi que sa proximité avec le lieu d'exploitation sont des avantages qui favorisent un projet rentable. Cette étude permet aussi de répondre à l'épineuse question

de l'utilisation des eaux polluées dans la chaufferie. Il suffit d'intercaler, en amont du système de traitement, un système de prétraitement fiable et bien choisi, pour ramener l'eau à un niveau exploitable dans les chaudières. Dans l'avenir, nous estimons que l'eau propre sera de plus en plus destinée à la consommation humaine plutôt qu'à l'alimentation des machines.

Les eaux usées et polluées peuvent servir exclusivement à l'alimentation des machines des installations de chaufferie industrielles, utilisée comme eau de refroidissement, eau de service, de nettoyage...

.../...



**CONCLUSION
GENERALE**

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail, réalisé sur le système lacustre tropical de Yamoussoukro, est d'alimenter une chaudière, à partir des eaux polluées des lacs. Il s'agit précisément d'évaluer le degré de pollution des lacs, d'estimer l'impact physique, thermique et économique sur un projet d'implantation d'une unité de chaufferie industrielle (de chauffage ou production de vapeur) utilisant comme eaux d'approvisionnement, les eaux des lacs de la ville de Yamoussoukro.

Pour mieux aborder le sujet, nous avons choisi les conditions les plus défavorables à savoir dix lacs entièrement périurbains dans la ville de Yamoussoukro pour effectuer notre étude. A partir de cette étude, nous évaluons théoriquement l'impact de la pollution sur la production de la vapeur ou d'eau chaude donc sur le développement économique, sanitaire et industriel. Jusqu'à présent, l'homme est présenté comme la seule victime des effets de la pollution ; or certaines parties des installations économiques et industrielles pourraient être affectées.

L'étude d'une vingtaine de paramètres physico-chimiques de chacun des 10 lacs choisis dans la ville de Yamoussoukro, sur une période de deux années montre que le nombre de paramètres qui dépendent linéairement de la pluviométrie dans les lacs est assez faible. Ce résultat, a priori surprenant, semble indiquer que les précipitations ont une influence négligeable sur les variations des paramètres ou qu'elles sont à l'origine de plusieurs effets antagonistes qui se compensent mutuellement.

Mais d'un lac à un autre, l'environnement des lacs (concentration de la population, les activités, les rejets...) a une influence notable sur la valeur des paramètres physico-chimiques. C'est le cas des matières en suspension, le potentiel d'hydrogène, les ions chlorures, la conductivité.... Aussi faut-il noter que la composition géologique des sols influence également certaines variables tels que les sels minéraux. La conductivité moyenne (210 $\mu\text{S/cm}$), caractéristique des eaux de surface, témoigne d'une minéralisation moyenne accentuée des lacs. Toutefois certains lacs tels que les lacs 5 ; 6 et 7 ont des conductivités assez élevées par rapport aux autres.

Ceci s'explique par la concentration des populations autour de ces lacs qui apportent des sels supplémentaires sous l'effet des rejets de diverses sortes. Sur l'ensemble des lacs étudiés, seuls les sels minéraux ont des concordances entre eux d'un lac à un autre. Cette

observation vient confirmer que les sels dissous ont pratiquement une origine géologique. Les résultats obtenus peuvent donc être élargis aux autres lacs.

Concernant les autres paramètres, l'analyse montre que les lacs des caractéristiques en dehors d'acceptabilité. S'il a été déduit des différentes études précédentes que les lacs sont pollués du point de vue biochimique et microbiologique, nous ajoutons que du point de vue industrielle les lacs sont pollués également. Le degré de pollution de chaque lac dépend de son environnement immédiat qui a une influence significative sur la teneur de celui-ci.

Comparés aux recommandations des fabricants et utilisateurs des chaudières, les paramètres physico-chimiques des lacs étudiés ne sont pas tolérables directement dans la chaudière. L'admission de ces eaux dans une chaudière nécessite un traitement préalable et cela, à plusieurs niveaux.

D'abord, il faut protéger ce milieu aquatique pour qu'il puisse répondre à sa mission première (touristique) ; pour ce faire il est nécessaire d'envisager un suivi environnemental. Ce suivi se résume en la réhabilitation des systèmes d'assainissement collectifs, la sensibilisation et la formation des populations sur certains comportements environnementalistes. Pour éviter le déversement des eaux usées dans les lacs, l'installation de nouvelles stations de traitement (le lagunage) par bassin versant et l'encouragement des systèmes d'assainissement autonome constituent des réponses fiables à cette préoccupation. Ensuite, le traitement de l'eau par des méthodes classiques doit être obligatoirement précédé d'un circuit de prétraitement en vue d'éliminer ou réduire les matières en suspension et/ou organiques, les boues, le sable...

Le dimensionnement d'un système de prétraitement entraîne un coût d'investissement supplémentaire.

L'étude de l'impact économique de la pollution sur le coût d'investissement et fonctionnement montre que l'utilisation des eaux des lacs occasionne des coûts additionnels sur le capital du projet. Mais ces surcoûts sont amortissables à court terme en raison de la gratuité de l'eau. En somme l'utilisation des eaux des lacs est économiquement rentable et offre une indépendance énergétique par rapport à l'utilisation des eaux commerciales.

Dans le contexte de la gestion des ressources en eaux, il ressort de cette étude que les eaux polluées peuvent être utilisées dans la chaufferie industrielle. Cette option permettra de faire l'économie de l'utilisation abusive des eaux souterraines « propres » qui devraient être destinées exclusivement à la consommation humaine. La mise en pratique de cette théorie permet donc de suivre la boucle présentée par le schéma de la figure 5.1 ci-dessous ; qui offre une nouvelle voie à suivre dans le cadre de la gestion des eaux de surfaces comme

souterraines. Il s'agira désormais de consacrer exclusivement les eaux souterraines et les eaux non polluées à la consommation humaine et agropastorale et les eaux rejetées et/ou usées à l'exploitation industrielle. Cette manière de voir les choses permettra de réduire considérablement le taux d'épuisement des réserves d'eaux douces sur la planète terre.

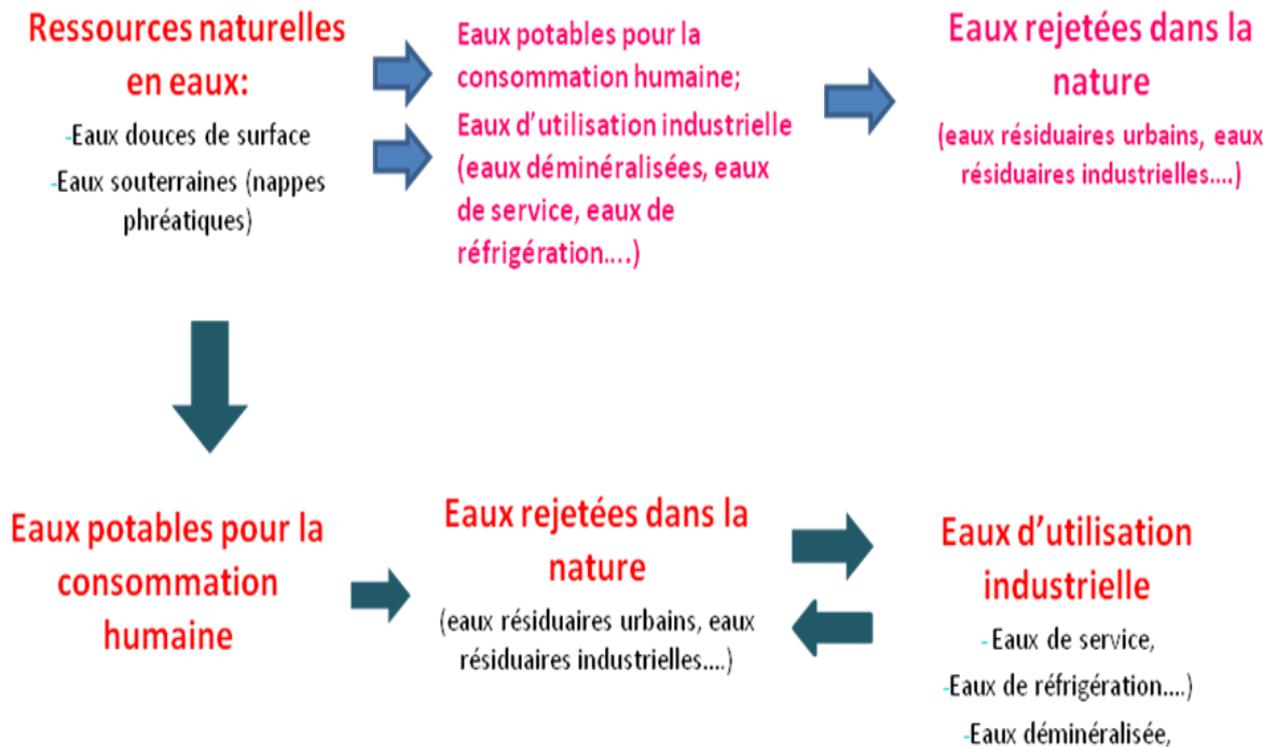
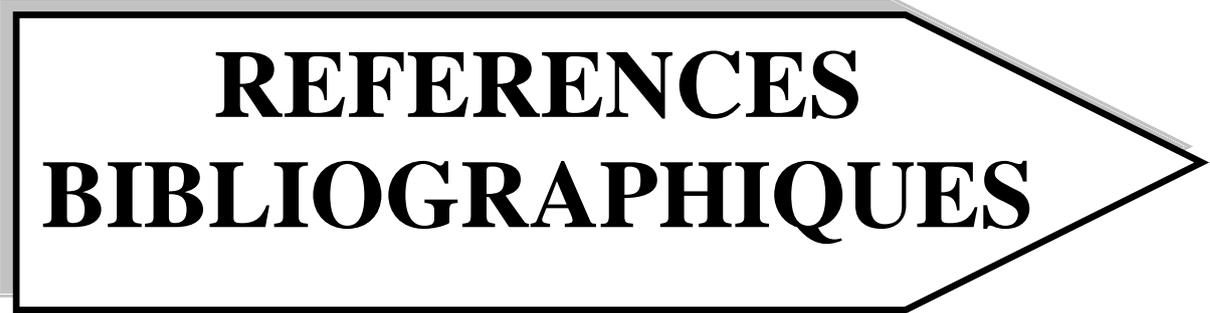


Figure 5.1 : Schéma d'exploitation des ressources d'eaux douces



**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] HAWKEN Paul, The ecology of commerce doing good business. Harper information, 1993, p288.
- [2] HAWHEN Paul; LOVINS et al. Natural capitalism: creating the next industrial revolution. Little brown, 1999, p415.
- [3] ARISTIDE QUILLET et A. Jean Didier, 1984, Encyclopédie des sciences industrielles, Electricité, Electronique et Généralités; n°d'ordre 184, 1984 , p655-734.
- [4] WALTER R. NIESSON. Combustion and incineration Processes Application Environmental Engineering. 1972
- [5] R.L. BANNISTER AND G.J. SILVESTRI, A. HIZUME, High Temperature supercritical steam Turbines, Mechanical engineering, 1987, p60-65.
- [6] OMS, UNICEF, Water for life: Making it happen, 6ème rapport, 2005
- [7] BANQUE MONDIALE, World water council et world development indicators. 2000
- [8] MOHAMED SALEM OULD MERZOUG, L'eau, l'Afrique, la Solidarité : Une nouvelle espérance, éd. Présence Africaine. 2005.
- [9] L. W. TILTON et J. K. Taylor, stand national de bureau de recherche de J., 20, 419 (RP1085) [1938](#).
- [10] E. Dorsey, « propriétés d'Eau-Substance ordinaire », (Reinhold Publishing Corporation) [1940](#).
- [11] RENE MALICET ; Union nationale des écoles de chauffage ; guide d'exploitation des chaufferies : matériels – équipements – automatisme – pollution – sécurité – sécurité – économie Edition Masson ; 1980, p209-246.
- [12] DE CURYPER K. DINNE K. Corrosion dans les installations de chauffage central ; CSTC/Bruxelles/BEL, périodique L.A. 1997
- [13] CETIM (centre technique des industries mécaniques) ; Guide pratique : introduction à la corrosion ; formes et prévention. 1988
- [14] DEGREMONT, Water treatment handbook vol1-2, 1991
- [15] JACQUES BERNARD, L'oxydation des métaux ; monographies. Facultés des sciences de Paris ; éd.gv. gauthier-villas et Cie éditeur- Paris ; Tome2. 1964

- [16] CSTC, la corrosion à l'oxygène dans les installations de chauffage équipées de tubes en matières plastiques : un état de la situation. Bruxelles, centre scientifique et technique de la construction. CSTC n°4 ; 3^{ème} cahier. 19997
- [17] MEYBECK M. CHAPMAN D. HELMER R. Global freshwater quality: a first assessment. Global monitoring system. Blawell 1989, p1-306
- [18] PIERRE ORBWSKI, Comment vaincre la corrosion métallique ? édition Eyrolles ; préface de Jean Cournot. 1972
- [19] WEISMAN AND R. ECKART, Modern power plant Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1985
- [20] ALEP SYRIA, Elimination de la dureté et des sulfates contenus dans les eaux par nanofiltration, université d'Alep DGE, faculté Génie civil Petro. 2000.
- [21] ALLATIN – ABBE ISIDORE, étude sur la centrale thermique de VRIDI; ENSIS2, ENG (4^{ème} année) INSET département énergétique ; 1987 p77
- [22] AGBROFFI DIAMO J. Conflits ethniques en Côte d'Ivoire, Université de Bouaké, Anthropologie, 2002, p1-9
- [23] BRITTON B., YAO B. and ADO G. Evaluation of Abidjan lagoon pollution, JASEM vol 10(3) 2006 p175-181.
- [24] ANTOINE LHOTE, critères d'évaluation de la qualité de l'eau d'un système tropical : approche statistique.. université de Poitiers. 2000
- [25] MAHAN N. Claude., Influence de l'hydroclimat sur la contamination microbienne des lacs de Yamoussoukro, Thèse de 3^{ème} cycle. Université d'Abidjan – Cocody. 2002
- [26] M.M. EL-WAKIL, Power plant Technology, McGraw-Hill, New York. 1984
- [27] N'DRI CELESTIN, Les lacs de Yamoussoukro sont devenus des sources d'épidémies, Fraternité Matin du 18 /07/2005
- [28] RYDING S.O ET RAST W. le contrôle de l'eutrophisation des lacs et réservoirs. Masson. Paris1-294. 1994
- [29] CHAMPIAT D. ET LARGENT J.P. Biologie des eaux, méthodes et techniques. Masson Paris. 1998 p1-374.
- [30] LACAZE J.C., L'eutrophisation des eaux marines et continentales. Ellipses Paris 1996, p1-191.
- [31] OCDE, Eutrophisation des eaux, Méthode de surveillance, d'évaluation et de lutte. Document OCDE. Paris 1982, p1-165.

- [32] ALLARD L. Les matières organiques produites par l'eutrophisation en eau douce. Nature, effets, cas particulier des algues bleues. Agence Financière de Bassin « Seine-Normandie ». Sous direction « ressources en eau », 1986.
- [33] R. C. FELLING AND W.J. COOK, Introduction to Thermodynamics, WCB, Dubuque, IA. 1985
- [34] BAROIN G. la pollution des eaux par les macrophytes. La recherche 221, 1990 p620-627 ;
- [35] BARD F.X., GUIRAL D. AMON MATHIAS J.B. et KOFFI P. K. Synthèse des travaux effectués au CRO sur les végétaux envahissants et polluants, Propositions et recommandations, J.Ivoir. Océanol. Limnol. Abidjan. 1(2): 1-8; 1985-1990
- [36] KOUASSI K.K.M. influence de la qualité de l'eau sur les végétaux aquatiques. Cas des lacs de Yamoussoukro. 1998.
- [37] ETTIEN N'DAH et ROBERT ARF, Macrophytes aquatiques dans les eaux continentales Ivoiriennes, CRO. Archives scientifiques vol. XV n°2, 1996
- [38] MULLIGAN H.F., pistia stratiotes dans le lac de Kossou (Côte d'Ivoire). Bull. phytosanitaire de la FAO, 1972, p7-10
- [39] TRAORE D. Etude de la végétation des milieux hydrophytiques ouverts en Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Bordeaux III, UFR Aménagement et Ressources naturelles, 1985, p1-433.
- [40] KOFFI K. P., Lutte contre les végétaux aquatiques envahissants en Côte d'Ivoire, séminaire régional sur la lutte contre les végétaux aquatiques flottants, Abidjan 17-21janv. 1995 p1-11
- [41] DELMAS R., LODJANI Ph. PODAIRE G. and OLIVEIRA J.F. Dam reservoir eutrophisation: a simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation. Wat. Res. 32 (11). 1998 p3477-3483;
- [42] CROS B. DELMAS R. et al. Seasonal trends ozone in equatorial Africa, experimental evidence of photochemical formation. Journal of Geophysical research. 93, 8355-8366. 1988
- [43] CAHIER A. and DUCRET J.: influence of biomasse burning on equatorial African rains. Nature 352; 1991 p228-230.
- [44] YOBOUE V. Caractéristiques physiques et chimiques des aérosols et des pluies collectés dans la savane humide de Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. n°d'ordre 914, 1991
- [45] NICHOLLS K.H. et DILON J.P. An evaluation of phosphorus-chlorophylle-phytoplankton relationship for lakes. Int. rev. geo.Hydrobiol. 63, 141-154. 1978

- [46] WILLIAM L. MASTER T. O. EMIJ SLOWINSKI. Chimical principales. Fourth édition SI version. 1977.
- [47] LEGUBE B. Le traitement des eaux de surface pour la production d'eau potable. Agence de l'eau, Loire-Bretagne. Poitiers. 1996, p1-198.
- [48] JEAN RODIER ; L'analyse de l'eau : eaux de mer, naturelles, résiduares, 7^{ème} édition Dunod, 1976, p133-175
- [49] TIMMER C.E. AND WELDON L.W. Evapo-transpiration and pollution of water by water hyacinth, hyacinth control journal 6; 1967, p34-37.
- [50] BABCOCK AND WILCOX Co. Steam, Its generation and Use, 39th ed., New York. 1978
- [51] LENTECH, Inositol phosphates: research reagents wide selection high purity: IP2-IP4 available. 2005
- [52] RAY K. LINSKY, JOSEPH FRANZINI, Water resources engineering ; 1979, p429-453
- [53] SIPRAX SARCO, Guide pratique : Régulation, mesure, traitement de l'air, technique du vide, tome2. 2000
- [54] PICOT FREDERIC, Environnement et qualité des eaux, Formulaire de travaux pratiques, INPHB Yamoussoukro, 2004
- [55] SIPRAX SARCO, Guide pratique : Equipements de chaufferie, Tome3. 2001
- [56] PIVORORA AND R. electromagnetic treatment water for and intermediate pressure steam boiler, petroleum engineering vol 32 N° 5. 1996
- [57] MICHEL MASSIN ; métallurgie générale et traitement thermiques : métallurgie pratique pour mécaniciens tome2 ; édition pyc. 1982, p53-78
- [58] RENE BUOIGE, DANIEL COUILLARD ; Traité pratique de chauuffage ; édition J.B baillère. 1976
- [59] BELTS DEARBORN, Industrial water conditioning, 1991.
- [60] LEBLOND P. Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'ivoire. Université de Bordeaux n°d'ordre : 2015 ; 1984,
- [61] BERNARD PARINET, ANTOINE LHOTE and BERNARD LEGUBE, Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system. Ecological Modeling 178, 2004 p295-311.

[62] BOUVY M., ARFI R., et al, Tropic coupling between bacterial and phytoplanktonic compartments in shallow tropical reservoirs (Ivory Coast, West Africa). *Aquat. Microb. Ecol.* 1998, p15, 25-37.

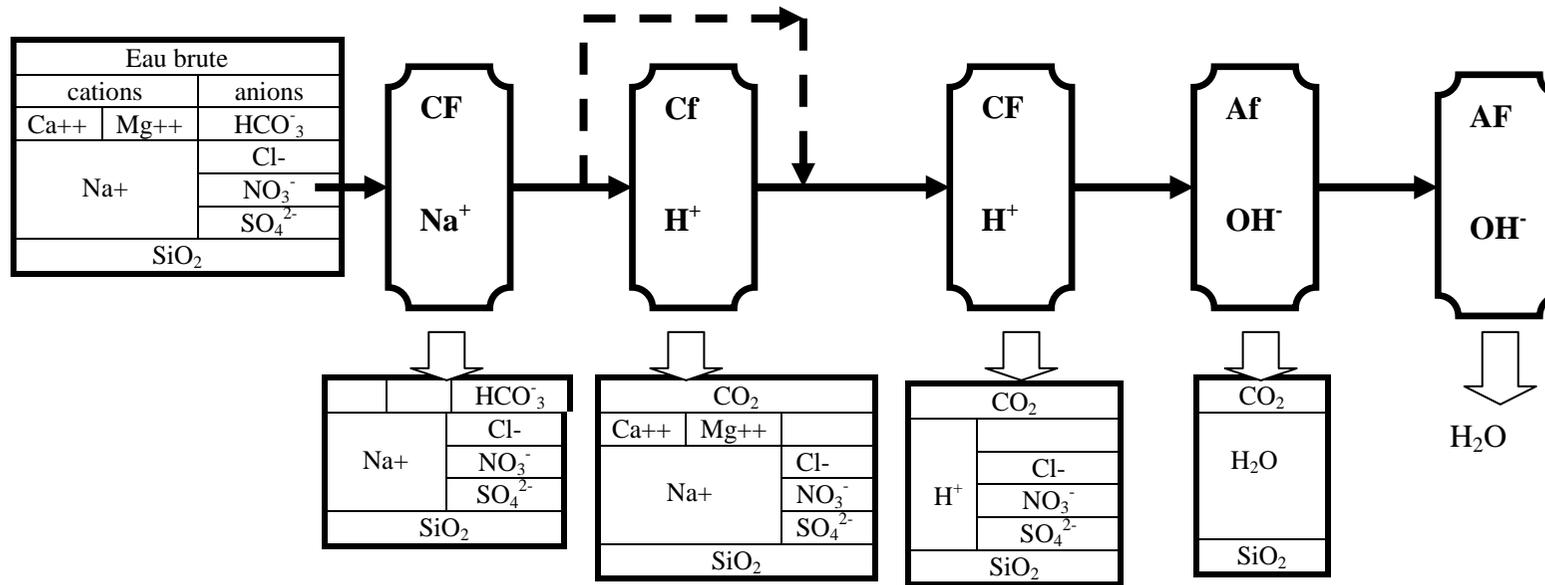
[63] VOGEL G. ET ANGENMANN, atlas biologie, stock, 1970, paris 1-566

[64] YUNUS A. and Michael A. *Thermodynamics: An Engineering Approach* second edition p1-987; 1994.

ANNEXES

- ANNEXE 1 : Diagramme récapitulatif des fonctions des différentes résines**
- ANNEXE 2 : Statistiques descriptive des paramètres des lacs**
- ANNEXE 3 : Fiche d'analyse d'échantillon d'eau brute**
- ANNEXE 4 : Feuille de calcul de la centrale thermique**
- ANNEXE 5 : Feuille de calcul du chauffage sanitaire**
- ANNEXE 6 : Feuille de calcul des organes de chauffage de l'hôtel**
- ANNEXE 7 : Courbes de tendance entre les paramètres fortement corrélés**
- ANNEXE 8 : Evolution des paramètres physicochimiques**
- ANNEXE 9 : Paramètres physicochimiques des différents lacs**
- ANNEXE 10 : Paramètres mensuels du lac 1 sur une année**
- ANNEXE 11 : Schéma pilote d'adoucissement**
- ANNEXE 12 : Schéma pilote de déminéralisation**
- ANNEXE 13 : Directives sur la qualité de l'eau de consommation humaine**
- ANNEXE 14 : Matrice des coefficients de corrélations linéaires entre les variables**
- ANNEXE 15 : Recommandations ABMA**
- ANNEXE 16 : Recommandations APAVE**

ANNEXE1 : DIAGRAMME RECAPITULATIF DES FONCTIONS DES DIFFERENTES RESINES



AF : résine anionique fortement basique
 Af : résine anionique faiblement basique
 CF : résine cationique fortement acide
 Cf : résine cationique faiblement acide

ANNEXE2 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES PARAMETRES DES LACS

	pH	Cond.	O2	Cl-	IPEB	TH	TAC	MES	NTU	E	NH4+	Ca++	Mg++	K+
Erreur-type	0,1606	19,0624	0,5167	1,6216	0,5821	0,1409	0,1653	3,4967	5,3579	3,3848	0,0652	0,0331	0,0326	2,3820
Médiane	7,33	180	3,405	16,9	4,48	1,45	1,92	23	26,9	356	0,115	0,35	0,19	13,09
Écart-type	0,508	60,280	1,634	5,128	1,841	0,445	0,523	11,057	16,943	10,704	0,206	0,105	0,103	7,532
Variance de l'échantillon	0,258	3633,733	2,669	26,295	3,388	0,198	0,273	122,267	287,074	114,569	0,042	0,011	0,011	56,738
Kurstosis (Coefficient d'aplatissement)	3,112	-0,750	-1,624	-0,944	2,940	-2,068	-1,679	-1,546	0,482	1,305	6,241	-0,273	7,366	-0,910
Coefficient d'asymétrie	1,580	1,030	0,436	-0,188	1,631	-0,154	0,129	-0,126	0,740	1,328	2,478	0,706	2,647	0,669
Plage	1,75	164	4,57	16	5,97	1,13	1,42	31	57,85	35	0,66	0,32	0,34	20,66
Minimum	6,85	153	2,13	8	3,53	0,77	1,28	5	6,45	345,5	0,08	0,26	0,17	7,94
Maximum	8,6	317	6,7	24	9,5	1,9	2,7	36	64,3	380,5	0,74	0,58	0,51	28,6
Nombre d'échantillons	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Niveau de confiance (95,0%)	0,3632	43,1220	1,1688	3,6683	1,3168	0,3187	0,3739	7,9100	12,1205	7,6570	0,1474	0,0749	0,0736	5,3884

ANNEXE3 : FICHE D'ANALYSE D'ECHANTILLON D'EAU

Origine :

Nature :

date :

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Couleur et odeur :	
Dépôt :	Turbidité.....
Résistivité à°C :	
Conductivité à°C :	pH à °C :

ANALYSE CHIMIQUE DE L'EAU FILTREE

degrés français	degrés français
Dureté totale (TH) :	Alcalinité libre :
Dureté carbonatée :	Titre alcalimétrique (TA) :
Dureté permanente :	Titre alcalimétrique complet (TAC) :
Dureté calcique (TCa) :	Sels d'acides forts (SAF) :
Dureté magnésienne (TMg) :	Salinité totale :

Silice exprimée en SiO ₂ :			Matière organique (KMnO ₄) :		
ANIONS	mg/L	méq/L	CATIONS	mg/L	méq/L
Chlorures Cl ⁻ :			Calcium Ca ⁺⁺		
Sulfates SO ₄ ²⁻			Magnesium Mg ⁺⁺		
Nitrates NO ₃ ⁻			Sodium Na ⁺		
Bicarbonates HCO ₃ ⁻			Potassium K ⁺		
Total :			Total		

ANNEXE 4 : FEUILLE DE CALCUL DE LA CENTRALE THERMIQUE

Puissance de la chaudière

$$W_{ch} = h_4 - h_3 = 3115.3 - 387.96 = 2727.34 \text{ kJ/kg}$$

(débit massique : $q_m = 10 \text{ kg/s}$)

$$\bar{W}_{ch} = q_m \cdot W_{ch} = 10 \times 2727.34 = 27273.4 \text{ kW} = \mathbf{27.27 \text{ MW}}$$

Choix du type de chaudière

Puissance : 27.27 MW

Débit massique : 36000 kg/h soit 36 tonnes/heure > 2 tonnes/heure.

Pressions de service : 30 bars

Le type de chaudière adapté est une chaudière à tubes d'eau.

Caractéristique de la pompe

$$W_p = \frac{v(P_2 - P_1)}{\eta_p} = \frac{0.001037(3000 - 75)}{0.85} = 3.57 \text{ kJ/kg}$$

Débit : ($q_m = 10 \text{ kg/s}$ soit $Q_v = 37.33 \text{ m}^3/\text{h}$)

$$\bar{W}_p = 10 \times 3.57 = \mathbf{35.7 \text{ kW}}$$

Choix de la pompe

- Type de pompe :

$$\bar{W}_p = 35.7 \text{ kW} ; \text{ la vitesse spécifique : } n_s = N \frac{Q_v^{0.5}}{H_{mt}^{0.75}} \Rightarrow n_s = 1.8212$$

pour $N = 1450 \text{ tr/min}$.

Sur le diagramme des turbopompes (Fig4.7), une pompe hélico-centrifuge est celle qui convient le mieux.

- Rayon de la pompe :

Le Coefficient angulaire de la pompe est :

$$\Omega = \omega \cdot \frac{Q_v^{0.5}}{(g \cdot H_{mt})^{0.75}} = \frac{\delta^{0.5}}{\mu^{0.75}} \Rightarrow \Omega = 0.3674.$$

Le rayon angulaire de la pompe est donnée par : $R = \frac{\Lambda Q_v^{0.5}}{(g H_{mt})^{0.75}} =$

0,674 Λ .

Puissance de la turbine

$$W_{turb.} = h_3 - h_4 = (3115.3 - 2403.2) = 712.1 \text{ kJ/kg}$$

$$\bar{W}_{turb.} = 10 \times 712.1 = 7121 \text{ kW} = \mathbf{7.121 \text{ MW}}$$

Rendement du système.

$$\eta = \frac{709.07}{2727.88} = 0.260 \text{ soit } \mathbf{26\%} ; \text{ contre le rendement de Carnot qui}$$

est de 41.4%.

ANNEXE 5 : FEUILLE DE CALCUL DU CHAUFFAGE SANITAIRE

a) La chaudière

La puissance utile de l'installation (Pu₁)

C'est la puissance nécessaire pour faire passer l'eau sanitaire de 25°C à 100°C.

$$\bar{W}_{U1} = \mathbf{q_m \cdot C_{pe} \cdot (T_f - T_i)}$$

$$q_{me} = \frac{V_e \cdot \rho_e}{t}$$

q_m : débit massique de l'eau (kg/s) **C_{pe}** : Chaleur massique de l'eau (kJ/kg.K)

T_f : température finale de l'eau (°C) **T_i** : température initiale de l'eau (°C)

V_e : volume d'eau (m³) **ρ_e** : masse volumique de l'eau (kg/m³)

t : la durée de fonctionnement (s).

A N: $q_m = 1000 \times 15000 \cdot 10^{-3} / (3 \times 3600)$

= 1.39 kg/s

On prendra **C_{pe}** = 4.18 kJ/kg°C

$$\bar{W}_{U1} = 1.39 \times 4.18 \times (100 - 25)$$

$$\bar{W}_{U1} = \mathbf{435,76kW}$$

Rendement de l'installation (η)

On utilisera le fuel lourd n°2 aux Caractéristiques suivantes

$$\rho_c = 0.88 \text{ kg / dm}^3 ; P_{ci} = 9700 \text{ kcal / kg}$$

$$\eta = \frac{Pu_1}{P_t}$$

P_t : puissance totale de la chaudière

$$\bar{W}_t = q_{mc} \cdot P_{ci}$$

q_{mc} : débit massique du combustible

$$q_{mc} = \rho_c \cdot \frac{V_c}{t} \quad \rho_c = \text{masse volumique du combustible,}$$

$$\rho_c = 0.88 \text{ kg/dm}^3 \quad V_c = \text{volume du combustible}$$

AN: $q_{mc} = 0,88 \times 146.4 / 3 \quad q_{mc} = \mathbf{42.94kg comb/h}$

$$\bar{W}_t = 40 \times 9700 \times 4.185 / 3.6 \quad \bar{W}_t = \mathbf{484.2 kW}$$

$$\eta = 435.76 / 484.2 \quad \eta = 0.966 \quad \text{Soit } \mathbf{\eta = 0.966\%}$$

Puissance utile de la chaudière (W_U)

$$\bar{W}_U = \mathbf{Q_{mc} \cdot P_{ci}} - \bar{W}_{ch} - \bar{W}_{imb} - \bar{W}_{ext}$$

$$\bar{W}_{ext} = 2 \text{ à } 5\% \text{ de } \mathbf{Q_{mc} \cdot P_{ci}}, \text{ on prendra } 3\% \text{ de } \mathbf{Q_{mc} \cdot P_{ci}}$$

$$\bar{W}_{imb} \text{ est négligeable } \bar{W}_{ch} = \mathbf{M_f \cdot C_{pf} \cdot (T_{ch} - T_0)}$$

avec $M_f = Q_{mc} + Q_{air}$

M_f : débit massique de fumée

Q_{air} : débit massique de l'air

$$\mathbf{Q_{air}} = \rho_{air} \cdot V_{air \text{ réel}} \cdot \mathbf{Q_{mc}} \quad \text{avec} \quad V_{air \text{ réel}} = \lambda \cdot V_{air \text{ th}}$$

V_{air th} : volume d'air théorique

V_{air réel} : volume d'air réel

c, h, s, o représentent respectivement les compositions massiques en carbone, en hydrogène, en soufre et en oxygène du combustible.

$$V_{airth} = 106.8 \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right)$$

En considérant le fuel lourd N°2

$$c = 84.5, \quad h = 11.5, \quad s = 3.5, \quad o = 0$$

Nous adapterons nos résultats du débit d'air du gaz à utiliser.

λ varie de 1.1 à 1.4, pour le fuel, on prendra $\lambda = 1.25$

Masse volumique de l'air $\rho_{air} = 1.293 \text{ kg / m}^3$

$$V_{airth} = 106.8 \left(\frac{84.5}{12} + \frac{11.5}{4} + \frac{3.5}{32} \right) / 100$$

$$V_{airth} = 10,71 \text{ Nm}^3/\text{kg comb}$$

$$V_{air\text{ réel}} = 1,25 \times 10,71$$

$$\underline{V_{air\text{ réel}} = 13,385 \text{ Nm}^3/\text{kg comb}}$$

$$Q_{mc} = 0,88 \times 146.4/3 \quad V_c = 146.4 \text{ litres}$$

$$Q_{mc} = 42.94 \text{ kg comb / h}$$

$$Q_{air} = 1,293 \times 13,385 \times 42.94$$

$$Q_{air} = 743.15 \text{ kg comb / h}$$

$$M_f = 743.15 + 42.94$$

$$M_f = 786.1 \text{ kg fumée / h} \quad \mathbf{M_f = 0,218 \text{ kg fumée / s}}$$

On prendra $C_{pf} = 1,13 \text{ kJ / kg}$

$$T_{ch} = 250^\circ\text{C}$$

$$T_o = 27^\circ\text{C}$$

$$\dot{W}_{ch} = 0,218 \times 1,13 \times (250 - 27)$$

$$\dot{W}_{ch} = \mathbf{55.024 \text{ kW}}$$

$$\dot{W}_{ext} = 3 \times 42.94 \times 9700 \times 4,185/100$$

$$\dot{W}_{ext} = \mathbf{52.29 \text{ kW}}$$

$$\dot{W}_U = 42.94 \times 9700 \times 4,185 / 3600 - 55.024 - 52.29$$

1.2 $\bar{W}_U = \underline{\underline{376.9 \text{ kW}}}$

Rendement thermique de la chaudière (η)

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \quad \eta=0.78 \quad \text{Soit } \underline{\underline{\eta=78\%}}$$

Puissance que doit fournir la chaudière (P_f)

$$\bar{W}_f = \dot{m}_v \cdot h_v = \dot{m}_v \cdot \Delta h = \dot{m}_v \cdot h_{fg}$$

On prendra la pression de service $P = 7$ bars.

Par lecture dans la table thermodynamique

$$t_s = 165 \text{ °C} ; \quad h_{fg} = 2067 \text{ kJ / kg} ; \quad h_g = 2764 \text{ kJ / kg}$$

Calcul du débit (\dot{m}_v)

$$\dot{m}_v = \frac{P_u}{h_{fg}} = 0.182 \text{ kg/s} = 0.656 \text{ t/h}$$

$$\bar{W}_f = 0,182 \times 2764 \quad \text{soit} \quad \bar{W}_f = \underline{\underline{503.05 \text{ kW}}}$$

Choix de la chaudière

La chaudière est destinée à un usage bien précis. Son choix est donc fonction des exigences du cahier de charge [pression de service, température, débit, état du fluide] qui conditionnent par ricochet le choix des différents paramètres de construction entre autres les matériaux.

Le choix de la chaudière résultera du calcul de ses caractéristiques, entre autres sa puissance utile, son timbre et son débit de production.

La puissance de production obtenue à partir du débit de vapeur calculé est de **503.05 kW** d'après la formule $W_f = \dot{m}_v \cdot h_v$.

Etant donné que les chaudières de 0.656t/h ne sont pas disponibles sur le marché, nous avons donc choisi celle dont le débit s'approche le plus de notre débit calculé : **une chaudière de 1t / h à tube de fumée**, qui couvre largement nos besoins, pour fournir l'énergie nécessaire.

Le brûleur

Le choix du brûleur porte sur les caractéristiques suivantes:

- les combustibles utilisés
- leurs Pci ;

Ici la chaudière peut fonctionner aussi bien au gaz qu'au fuel. Cela nous impose le choix d'un brûleur mixte. Les combustibles utilisés sont le fuel lourd N°2 et le butane qui sont les plus consommés. Pour une utilisation du brûleur, le débit de combustible sera :

- **au fuel :**

$$Q_{m \text{ fuel}} = V \text{ fuel} / t$$

$$Q_{m \text{ fuel}} = 128.82 / 3$$

$$\underline{Q_{m \text{ fuel}} = 50 \text{ l} / \text{h}}$$

Puissance du brûleur : P_b

$$\bar{W}_b = \rho_{\text{fuel}} \times Q_{m \text{ fuel}} \times P_{ci \text{ fuel}}$$

$$\text{AN : } \bar{W}_b = 0,88 \times 50 \times 10000 \times 4,185 / 3600$$

$$\mathbf{1.3 \quad \bar{W}_b = \underline{511.5 \text{ kW}}}$$

ANNEXE 6 : CALCUL DES ORGANES DE L'INSTALLATION DE CHAUFFAGE DE L'HOTEL.

La chaudière

La puissance utile de l'installation (Pu₁)

C'est la puissance nécessaire pour faire passer l'eau domestique de 25°C à 70°C.

$$W_{ui} = m C_{pe} \cdot (t_f - t_i)$$

W_{ui} = quantité de chaleur

m : masse d'eau à chauffer C_{pe} : Chaleur massique de l'eau

t_f : température finale de l'eau t_i : température initiale de l'eau

On prendra $C_{pe} = 4.18$ kJ/kg

$$\underline{W_{ui} = 3766,5 \text{ kJ}}$$

Pour une heure $W_{ui} = 1883,25 \text{ kJ}$ soit une puissance $\bar{W}_{U1} = 523,125 \text{ kW}$ (puissance qu'il faut fournir pour élever la température de l'eau de 25°C à 70°C).

Soit P_{ch} la puissance produite par la chaudière.

$$\bar{W}_{ch} = \bar{W}_{U1} / \eta = 523,12 / 0,85 = 615,44 \text{ kW.}$$

$$\bar{W}_{ch} = \underline{615,44 \text{ kW}}$$

Débit d'eau dans le circuit vapeur.

$$\bar{W}_{ch} = q_m(h_2 - h_1) \text{ soit } q_m = 615,44 / (2727,3 - 419,04) = 0,27 \text{ kg/s}$$

Puissance calorifique du brûleur.

Pour un rendement thermique de 0,86 $\bar{W}_b = 615,44 / 0,86 = 715,63 \text{ kW}$

$$\bar{W}_b = \underline{\underline{715,63 \text{ kW}}}$$

Puissance de la pompe alimentaire

$$W_p = v \cdot \Delta P / \eta_p = 0,001044(543 - 100) / 0,85 = 0,462 \text{ kJ/kg}$$

Soit $\bar{W}_p = 0,462 \times 0,27 = 0,125 \text{ kW}$

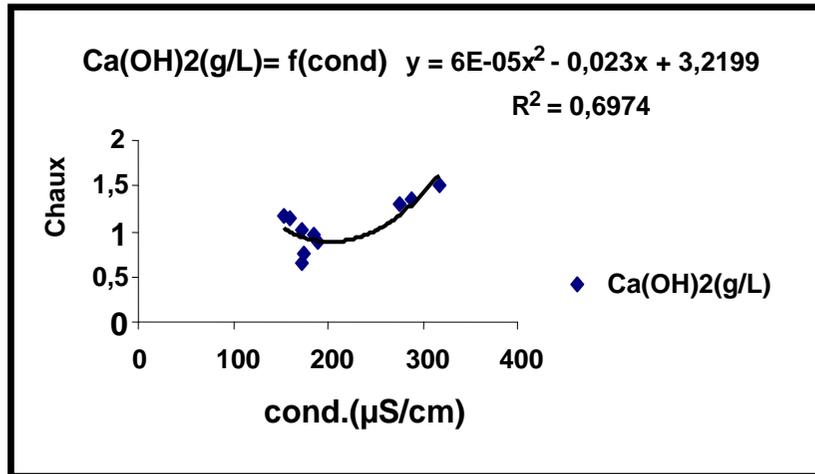
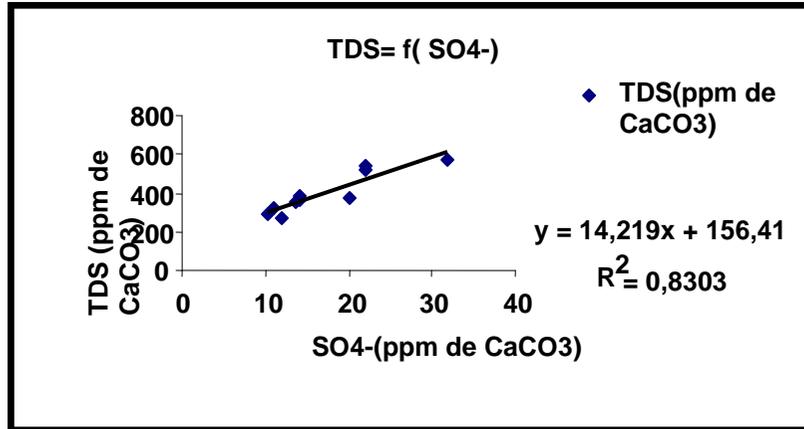
$$\bar{W}_p = \underline{\underline{125 \text{ W}}}$$

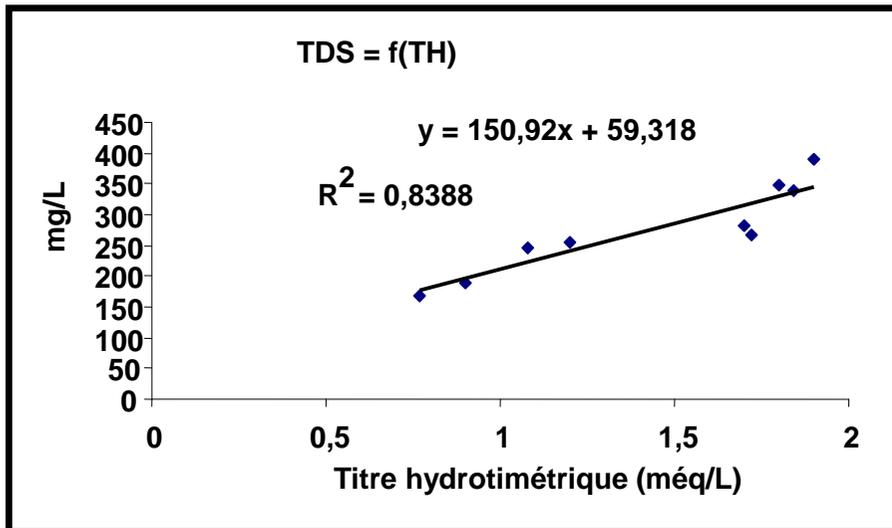
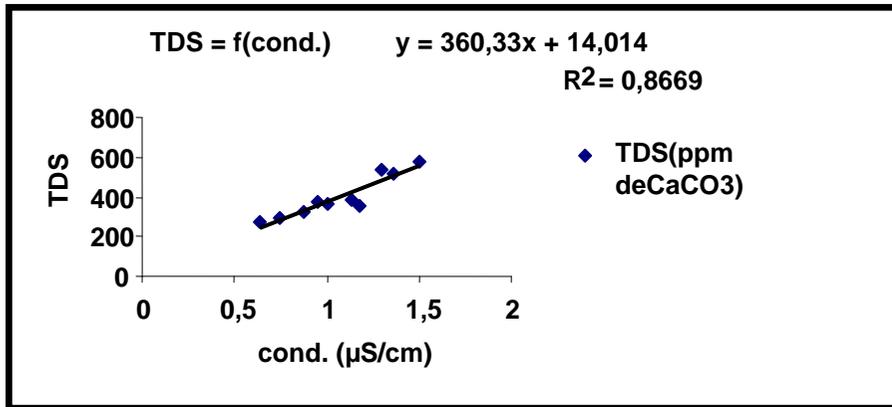
Rendement du système

$$\eta = 523,12 / (715,63 + 0,125) = 0,73$$

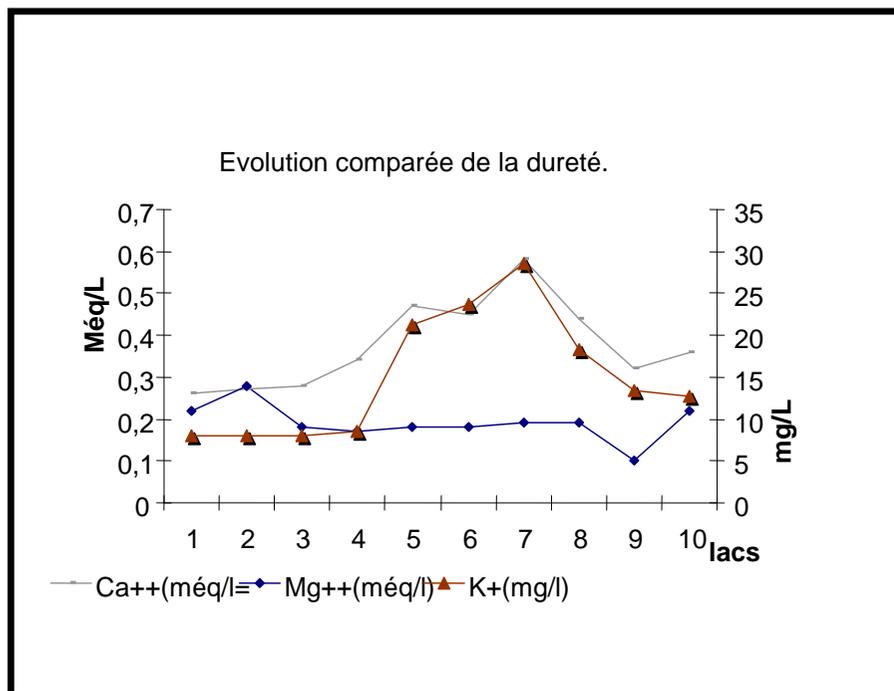
Soit $\underline{\underline{\eta = 73\%}}$

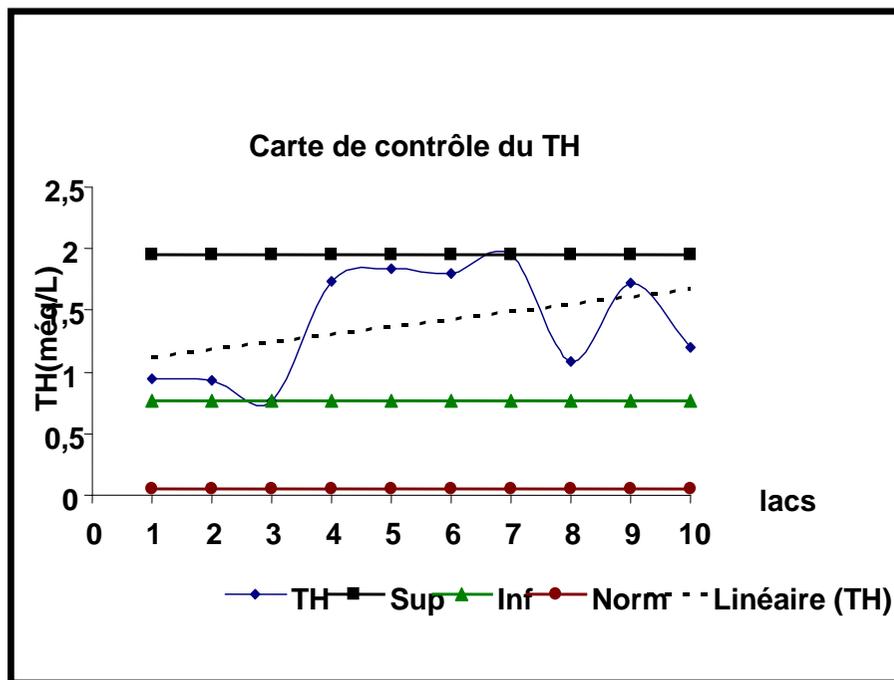
ANNEXE 7 : COURBES DE TENDANCE ENTRE LES PARAMETRES FORTEMENT CORRELES





ANNEXE 8 : EVOLUTION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES





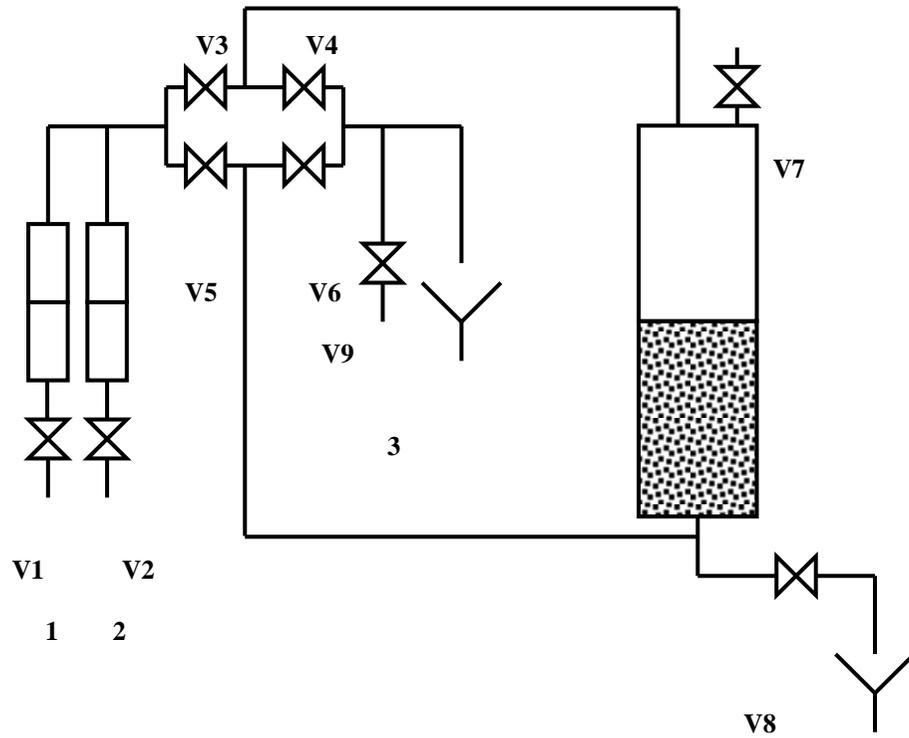
ANNEXE 9 : PARAMETRES PHYSICO CHIMIQUES DES LACS DE LA VILLE DE YAMOISSOUKRO

Lacs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>pH</i>	6,95	7,3	7,84	8,6	7,41	7,39	7,3	6,85	7	7,36
<i>Cond.(μS/cm)</i>	189	175	172	161	288	276	317	185	172	153
<i>O₂ mg/L</i>	2,97	5,5	6,7	5,8	2,7	5,59	2,7	3,68	3,13	2,13
<i>Cl mg/L</i>	19,8	18	15,8	14	20,3	24	19	11,5	9,8	8
<i>IP mgO₂/L</i>	3,75	4,1	4,86	5,9	6,41	5,62	9,5	4,01	3,69	3,53
<i>TH (méq/L)</i>	0,95	0,9	0,77	1,7	1,84	1,8	1,9	1,08	1,72	1,2
<i>TAC (méq/L)</i>	1,48	1,3	1,28	2,2	2,48	2,4	2,7	1,52	1,72	2,12
<i>MES (mg/L)</i>	10	19	27	36	28	15	30	35	5	11
<i>NTU</i>	6,45	18	28	43	38,4	25,8	41	17,3	17,15	64,3
<i>E (mV)</i>	380,5	372	355	351	358,5	345,5	357	350	351	357
<i>NH₄⁺ (mg/l)</i>	0,08	0,09	0,09	0,11	0,35	0,74	0,12	0,16	0,1	0,14
<i>Ca⁺⁺ (méq/l)</i>	0,67	0,65	0,54	1,21	1,38	1,39	1,44	0,78	0,72	0,79
<i>Mg⁺⁺ (méq/l)</i>	0,28	0,28	0,23	0,52	0,46	0,41	0,51	0,31	0,33	0,42
<i>K⁺ (mg/l)</i>	7,94	7,94	7,94	8,55	21,33	23,74	28,6	18,26	13,4	12,78
<i>Na⁺ (ppm de CaCO₃)</i>	97,4	83,48	83,48	83,48	139,14	153,05	153,05	125,22	97,4	97,4
<i>SO₄²⁻ (ppm de CaCO₃)</i>	10,94	10,2	11,97	14,16	21,98	22,08	31,875	20,1	14,06	13,64
<i>TDS (ppm de CaCO₃)</i>	322,27	294,24	272,01	384,59	541,95	539,9	575,175	371,24	364,32	355,64

ANNEXE 10 : PARAMETRES MENSUELS DU LAC1 SUR UNE ANNEE

<i>Lac 1</i>	<i>Janvier</i>	<i>Février</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juillet</i>	<i>Août</i>	<i>Septembre</i>	<i>Octobre</i>	<i>Novembre</i>	<i>Décembre01</i>	<i>Moyenne</i>
<i>T (°C)</i>	27,5	27,5	27,7	28,7	29,1	26,8	27	26,3	27	28,7	28	27,5	27,65
<i>pH</i>	7,6	7,7	7,6	7,5	7,7	7,4	7,6	7,6	7,8	7,5	7,5	7,5	7,58
<i>Cond. µS/cm</i>	209	201	210	203	203	173	171	176	189	203	203	203	195,33
<i>O2 (mg/L)</i>	5,9	7,3	6,4	5,9	7,3	6,6	6,9	7,9	8,9	6,1	6,8	9,5	7,13
<i>E (mV)</i>	346	402	396	354	371	405	464	442	362	333	421	365	388,42
<i>MES (mg/L)</i>	8	5	9	8	11	7	7	11	15	10	11	11	9,42
<i>TAC (méq/L)</i>	1,26	1,38	1,43	1,35	1,28	1,13	1,13	1,11	1,23	1,24	1,24	1,25	1,25
<i>IPEB (mgO2/L)</i>	3,94	4,58	4,61	4,97	4,29	4,73	4,29	4,48	3,9	5,03	4,23	4,9	4,50
<i>NH4+ (mg/L)</i>	0,21	0,06	0,06	0,1	0,12	0,06	0,1	0,02	0,07	0,07	0,04	0,07	0,08
<i>Nitrates (mgN/L)</i>	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02
<i>Calcium (mg/L)</i>	17,3	17,2	16,2	15,2	14,2	12,6	11,3	11,8	13,4	14,2	14,7	14,2	14,36
<i>Potassium (mg/L)</i>	8,5	8,6	8,5	8,2	8,5	7,4	6,6	7,5	8,6	9,2	6,7	7,2	7,96
<i>Sodium (mg/L)</i>	10,3	9,6	10,5	10,7	10,3	10,2	9,4	10,1	12,4	13,1	10,9	13,3	10,90
<i>Magnésium (mg/L)</i>	5,8	6	5,6	5,3	5,4	4,3	3,9	4	4,4	4,6	4,8	4,7	4,90
<i>Phos tot (mg P/L)</i>	0,04	0,03	0,04	0,04	0,09	0,04	0,05	0,06	0,13	0,04	0,06	0,12	0,06

ANNEXE 11 : SCHEMA PILOTE D'ADOUCCISSEMENT



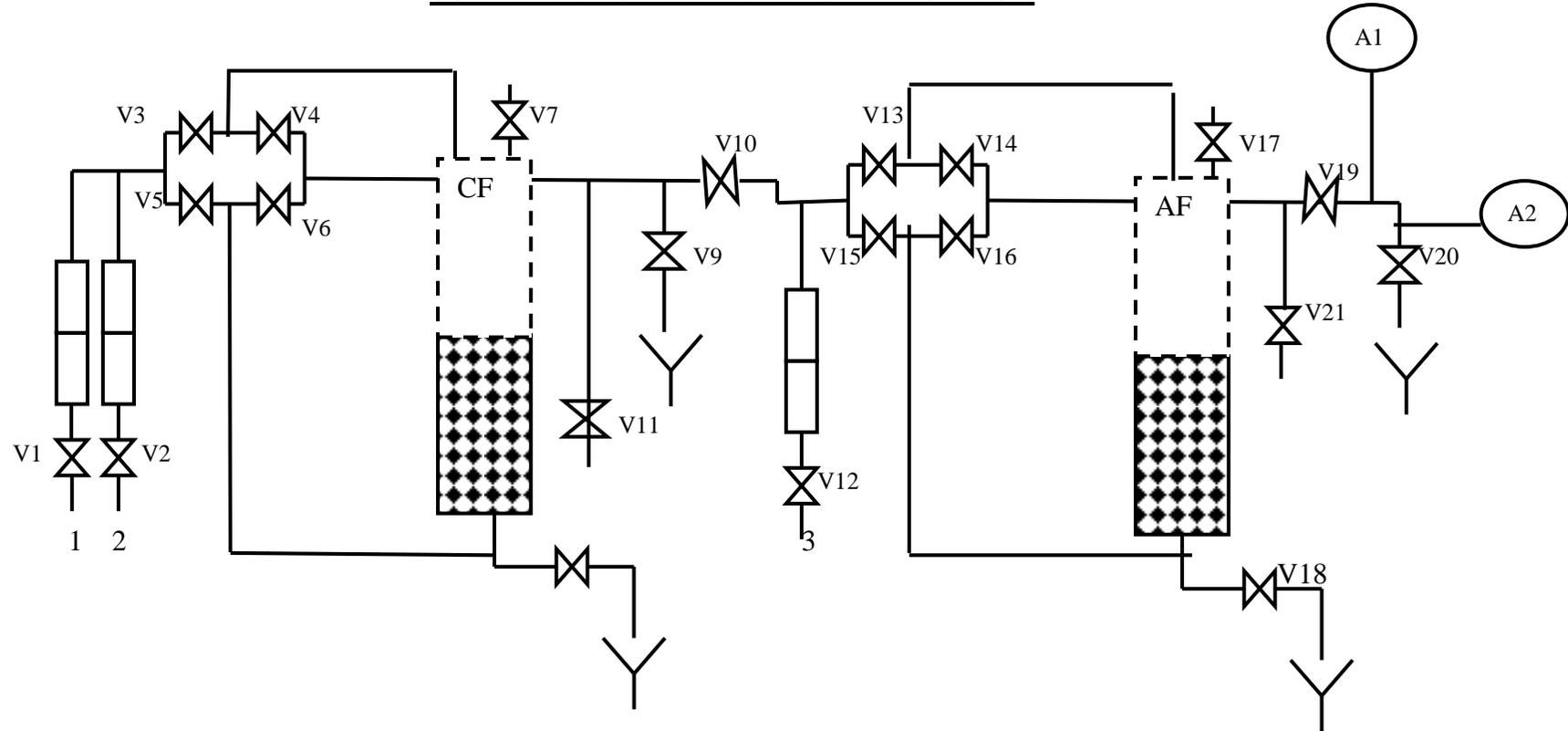
- 1 : Eau à traiter
- 2 : Solution de NaCl
- 3 : Prélèvement

Etat des vannes lors d'un cycle complet d'épuisement du filtre adoucisseur

<i>Vannes</i>	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
<i>Epuisement</i>	0	F	0	F	F	0	F	F
<i>Soulèvement</i>	0	F	F	0	0	F	F	F
<i>Abaissement de niveau d'eau</i>	F	F	F	F	F	0	F	F
<i>Régénération</i>	F	0	0	F	F	0	0	F/0
<i>Rinçage lent (avec pompe)</i>	F	0	0	F	F	0	0	F
<i>Rinçage rapide</i>	0	F	0	F	F	0	F	F

O : état ouvert
F : état fermé

ANNEXE 12 : SCHEMA PILOTE DE DEMINERALISATION



- A1 : Mesure du pH
- A2 : Mesure de la conductivité
- V11 et V21 : Vannes des prélèvements
- 1 : Eau brute
- 2 : Solution de HCl
- 3 : Solution de NaOH

Etat des vannes lors d'un cycle complet de déminéralisation.

Vannes	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20
Epuisement (production eau déminéralisée)	0	F	0		F	0	F	F	F	0	F	F	0	F	0	F	F	0	0
Régénération CF	0	F	F	0	0	F	F	F	0	F									
Soulèvement		F	F				0	F/0	0	F									
Régénération co-courant	F	0	0	F	F	0	0	F	0	F									
Rinçage lent (avec pompe)	F	0	0	F	F	0	0	F	0	F									
Rinçage rapide (eau brute)	0	F	0	F	F	0	F	F	0	F									
Régénération AF																			
Soulèvement eau brute	F	F	0	0	F	F	F	F	F	0	F	F	0	0	F	F	F	0	0
Abaissement niveau d'eau	F	F								F	F					0	F/0	0	0
Régénération co-courant	F	F								F	0	0	F	F	0	0	F/0	0	0
Rinçage lent (avec pompe)	F	F								F	0	0	F	F	0	0	F	0	0
Rinçage rapide (eau décactionnée)	0	F	0	F	F	0	F	F	F	0	F	0	F	F	0	F	F	0	0

ANNEXE 13a : Paramètres chimiques

Paramètres	Symbole/formule	Valeur paramétrique (mg/l)
Acrylamide	C ₃ H ₅ NO	0.0001
Antimoine	Sb	0.005
Arsenic	As	0.01
Benzène	C ₆ H ₆	0.001
Benzo(a)pyrene	C ₂₀ H ₁₂	0.00001
Bore	B	1.00
Bromate	Br	0.01
Cadmium	Cd	0.005
Chrome	Cr	0.05
Cuivre	Cu	2.0
Cyanure	CN =	0.05
1,2-dichloroethane	C ₁ CH ₂ CH ₂ Cl	0.003
Épichlorhydrine	C ₃ H ₅ OCl	0.0001
Fluorure	F	1.5
Rôle principal	Pb	0.01
Mercure	Hg	0.001
Nickel	Ni	0.02
Nitrate	NO ₃	50
Nitrite	NO ₂	0.50
Pesticides		0.0001
Pesticides - Total		0.0005
PAHs	C ₂ H ₃ N ₁ O ₅ P _{1 3}	0.0001
Sélénium	Se	0.01
Tetrachloroethene et trichloroethene	C ₂ Cl ₄ /C ₂ HCl ₃	0.01
Trihalomethanes - Total		0.1
Chlorure du vinyle	C ₂ H ₃ Cl	0.0005

ANNEXE 14 : Matrices des coefficients de corrélations linéaires entre les variables

	pH	Cond.	O2	Cl-	IPEB	TH	TAC	MES	NTU	ddp	NH4+	Ca++	Mg++	K+	Na+	SO ₄ ²⁻	TDS
pH	1																
Cond.	-0,1522	1															
O2	0,5841	0,2352	1														
Cl-	0,0230	0,6990	0,2646	1													
IPEB	0,2801	0,8124	-0,0530	0,4769	1												
TH	0,1679	0,6526	-0,2783	0,2173	0,6369	1											
TAC	0,2216	0,7285	-0,3580	0,2771	0,7404	0,8818	1										
MES	0,4773	0,2144	0,3001	0,0944	0,5232	0,0978	0,1942	1									
NTU	0,4688	0,0835	-0,2267	-0,3084	0,3207	0,3291	0,6086	0,1982	1								
ddp	-0,2816	0,1513	-0,1992	0,2322	-0,2213	-0,5157	-0,4115	-0,2981	-0,3554	1							
NH4+	-0,0243	0,5549	0,1587	0,5815	0,1849	0,4669	0,4858	-0,0842	0,0331	-0,4432	1						
Ca++	-0,1150	0,8296	-0,3742	0,2554	0,7785	0,6977	0,8079	0,4193	0,3639	-0,4698	0,4179	1					
Mg++	-0,0773	0,0865	0,0888	0,2524	-0,1099	-0,5543	-0,2547	0,0560	0,0169	0,6441	-0,1216	-0,1973	1				
K+	-0,2734	0,8848	-0,3751	0,3576	0,7050	0,7019	0,7653	0,2136	0,2180	-0,4459	0,5529	0,9620	-0,2335	1			
Na+	-0,3248	0,9060	-0,3403	0,5051	0,6316	0,6373	0,7139	0,1760	0,0913	-0,3536	0,6664	0,9040	-0,1661	0,9688	1		
SO₄²⁻	-0,1316	0,8761	-0,3257	0,3431	0,8377	0,6905	0,7743	0,3971	0,2549	-0,4161	0,3923	0,9822	-0,2235	0,9637	0,9099	1	
TDS	-0,0297	0,9181	-0,3227	0,4958	0,7755	0,8570	0,9118	0,2196	0,2984	-0,3843	0,6226	0,9034	-0,2495	0,9230	0,9152	0,9017	1

ANNEXE 15 : RECOMMANDATIONS APAVE (LENTECH, 2005)

		Pression de service (Bar)							
		0 - 20.7	20.8 - 31.0	31.1 - 41.4	41.5 - 51.7	51.8 - 62.1	62.2 - 68.9	69.0 - 103.4	103.5 - 137.9
1.3.1.1 Eau d'alimentation									
<u>Oxygène</u> dissous (mesuré avant l'addition du réducteur d'oxygène)		0.04	0.04	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
<u>Fer</u> Total		0.1	0.05	0.03	0.025	0.02	0.02	0.01	0.01
<u>Cuivre</u> Total		0.05	0.025	0.02	0.02	0.015	0.015	0.01	0.01
<u>Dureté</u> totale(CaCO3)	mg/l	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.05	non spécifiée	
COT non-volatile		1	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2
Matière huileuse		1	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2
<u>pH</u> à 25°C		7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	8.5 - 9.5	9.0 - 9.6	9.0 - 9.6
1.3.1.2 Eau de chaufferie									
<u>Silice</u>		150	90	40	30	20	8	2	1
<u>Alcalinité</u> totale CaCO3	mg/l	350	300	250	200	150	100	non spécifiée	
Alcalinité d'hydroxyde libre CaCO3		non spécifiée				non détectable			
Conductance spécifique à 25°C sans neutralisation	mS/cm	3500	3000	2500	2000	1500	1000	150	100

ANNEXE 16 : RECOMMANDATIONS ABMA (LENTECH, 2005)

		Pression de service (Bar)						
		0 - 15	15 - 25	25 - 35	35 - 40	40 - 60	60 - 75	75 - 100
1.3.1.3 Eau d'alimentation								
Oxygène dissous(mesuré avant l'addition du réducteur d'oxygène)	mg/l	0.02 (Elimination physique de l'oxygène dissout)						
Dureté totale	degré Français	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.05	0.05
Matière huileuse	mg/l	Absence				0.05	0.05	0.05
pH		> 8.5						
Fer Total	mg/l	non spécifiée				0.05	0.05	0.03
Cuivre Total	mg/l	non spécifiée				0.03	0.03	0.01
1.3.1.4 Eau de chaufferie								
Alcalinité M	degré Français	100	80	60	40	15	10	5
Alcalinité P	degré Français	0.07 M	0.07 M	0.07 M	0.07 M	> 0.5 M	> 0.5 M	> 0.5 M
SiO2		200	150	90	40	15	10	5
TDS	mg/l	4000	3000	2000	1500	500	300	100
Phosphates		30 to 100	31 to 100	20 to 80	21 to 80	10 to 60	10 to 40	5 to 20
pH		10.5 to 12				10 to 11		
Eau d'appoint		adoucie et carbonate libre				Déminéralisée		

