Conception et dimensionnement d'un système de traitement des eaux usées brassicoles à douala, Cameroun: une solution technologique pour la protection de l'environnement en Afrique Subsaharienne

Design and sizing of a brewery wastewater treatment system in douala, cameroon: a technological solution for the protection of the environment in sub-saharan africa

¹Auguste Landry Kamegne Kamto; ¹Celestin Defo

¹Université de Dschang, Antenne d'Ebolowa, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles, Filière des Métiers de Bois, de l'Eau et de l'Environnement, BP 786, Ebolowa, Cameroun

[Email : defo1.celestin@yahoo.fr](mailto:defo1.celestin@yahoo.fr)

Résumé

L'objectif de cette étude était de concevoir et de dimensionner une station de traitement en vue de la réutilisation des eaux usées industrielles d'une entreprise brassicole à Douala. Il s'agissait de caractériser ces eaux, d'opérer un choix technique de la station la plus appropriée et de dimensionner la station de traitement adaptée pour la réutilisation de ces ressources en eaux. Pour ce faire, les analyses physico-chimiques et bactériologiques ainsi que les mesures de débit ont été effectuées au niveau du point de rejet de l'entreprise brassicole. Les principaux résultats ont montré que la demande chimique en oxygène (1082 mg/l), la demande biochimique en oxygène (466 mg/l) et la teneur en azote total (57 mg/l) sont au-dessus des normes camerounaises de rejets, de même que le nombre de coliformes fécaux (0,99 millions d'unités formant colonies/ 100 ml) et de coliformes totaux (6,77 millions d'unités formant colonies/ 100 ml). La technologie d'épuration du lit bactérien a été jugée la plus appropriée. Pour traiter le débit d'eaux usées estimées à 2700 m³ par jour, la station comporte les ouvrages suivants : un dégrilleur (mailles 0,5 centimètres) ; un déshuileur (puissance d'aération 3 400 Watts) ; un décanteur lamellaire (volume 1165 m³) ; un lit bactérien (cloisonné, hauteur 2,5 m et surface 676 m²) ; un second décanteur lamellaire avec traitement de l'équilibre calco-carbonique (Consommation CO₂ :81,07 Nm³, consommation chaux : 150 Kg, diamètre 25 m), un bio-digesteur ; un bassin de désinfection (surface 338 m², taux de traitement 0,65 g/m³, débit d'injection 12 litres/h). Le coût de réalisation du projet est estimé à 370 millions de F CFA Hors Taxes. La construction de ces ouvrages permettra d'améliorer la protection de l'environnement autour de l'entreprise concernée.

MOTS CLÉS : Qualité de l'eau, station d'épuration, lit bactérien

1. Abstract

The objective of this study was to conceive and dimension a station of processing for the re-use of industrial wastewater of a brewery company with Douala. It was a question of characterizing wastewater, operating a technical choice of the station more adapted and dimensioning the station of

processing adapted for the re-use of these water resources. With this intention, the physicochemical and bacteriological analyses as well as measurements of flow were taken on the level of the outlet of the brewery company. The principal results showed that the chemical request oxygenates some (1082 mg/l), the biochemical request oxygenates some (466 mg/l) and the content total nitrogen (57 mg/l) are above the Cameroonians 'standards of rejections, just as numbers faecal coliforms (0,99 million units forming colonies/100 ml) and of total coliforms (6,77 million units forming colonies/100 ml). The technology of purification of the bacterial bed was considered to be most suitable. To treat the waste water flow estimated at 2700 m³ per day, the station comprises the works : a screen cleaner (meshes 0,5 centimetres); a deoiler (power of ventilation 3 400 Watts); a lamellate decanter (volume 1165 m³); a bacterial bed (cloisonyl, height 2,5 m and surface 676 m²); a second lamellate decanter with processing of calco-carbonic balance (Consumption CO₂: 81,07 Nm³, consumption lime: 150 kg, diameter 25 m), a bio-digester; a basin of disinfection (surface 338 m², rate of processing 0,65 g/m³, flow of injection 12 liters / H). The cost of realisation of the project is estimated at 370 million F CFA Net of tax. The construction of these works will make it possible to improve the environmental protection around the company concerned.

Keys words: Quality of water, station of purification, reads bacterial

2. Introduction

Dans les villes des pays en voie de développement, la population croît si rapidement que les économies locales, les services publics et les infrastructures ne peuvent suivre. Ceci engendre d'énormes problèmes auprès des autorités chargées de l'aménagement et du développement urbain concernant les secteurs les plus cruciaux tels que les services d'assainissement et de distribution d'eau potable. (Mpakam et al., 2006). De 2005 à 2018, la population camerounaise est passée de 17 463 836 à 23 000 000 habitants environs (INS, 2015). Paradoxalement, le « taux moyen d'accès à l'eau potable est de 45 % en milieu rural contre 77 % en milieu urbain et la population ayant accès aux services d'assainissement adéquat est estimée à 13,5 % en milieu rural contre 17 % en milieu urbain ». Ainsi, malgré l'énorme richesse hydrographique du pays manifestée par la présence d'une cinquantaine de cours d'eau réparties en 5 bassins hydrographiques (Kouam et al., 2006) pour un volume de 285,5 milliards de m³ d'eau avec une quantité renouvelable de 5 kilomètres cubes d'eau souterraine produite chaque année, l'eau potable reste une denrée rare au Cameroun. Couplée à la pénurie d'eau, les pollutions accrues des cours d'eaux par les industries et le mauvais assainissement domestique compromettent de plus en plus les possibilités d'approvisionnement en eau de rivière par la pollution (Dibong et Ndjouondo, 2014). À titre illustratif, la rivière Mgoua drainant la grande partie des eaux usées industrielles de Douala subit des pollutions de l'ordre de 211 mg/l de solides totaux dissous et une valeur maximale de 421 mg/l de DCO (Baok, 2006), donc exempte de tout prélèvement pour tout usage sans traitement préalable. La pollution évaluée aux alentours d'une entreprise agro-industrielle à Maroua révèle les taux de nitrates allant de 165 à 610 mg/l de nitrates (Aboubakar, 2017). À Yaoundé, l'activité industrielle des entreprises à l'entrée Sud de la ville polluent les cours

d'eau (Eaux du Mfoundi et affluents), les rendant impropres à la consommation (Ndzie, 2013). Un constat : la majorité des industries aussi bien dans la ville de Yaoundé que Douala déversent leurs effluents dans le milieu naturel sans traitement préalable, à l'exception de la SABIC qui a initié un programme d'épuration des eaux usées de leurs unités de production (Baok, 2006; Ndzie 2013). La ville de Douala présente un cas particulier. Avec des aquifères très vulnérables aux pollutions de surface et de grands prélèvements d'eaux souterraines par les industries dans le bassin de Besseke à Douala, les risques de pollutions de la nappe sont accrues (Feumbe, 2015; Defo et al, 2016). Si on note actuellement une absence de contamination critique des eaux souterraines, le risque toxicologique réside dans le caractère cumulatif des polluants et métaux lourds (Kengni et al., 2012). Pourtant dans la plupart des pays en développement en général et au Cameroun en particulier, la grande majorité des populations ont directement recours aux eaux de la nappe et aux cours d'eau pour leur approvisionnement (Mpakam et al., 2006). Cette pollution est à l'origine des maladies hydriques au Cameroun. C'est ainsi que le Cameroun a connu une grave épidémie de choléra en 2010, avec 350 décès signalés (INS, 2013). Dans la ville de Bafoussam- Cameroun, ces maladies représentent la deuxième cause de mortalité et de morbidité infantile, après le paludisme. (Mpakam et al., 2006). Dans la zone industrielle de Yaoundé, sur dix cas d'hospitalisation, deux sur trois souffrent de maladies hydriques (Ndzie, 2013). Dans la ville de Douala, le niveau de pollution est tel que la dose de mercure retrouvée dans les cheveux d'un échantillon représentatif de population varie de 0,90 à 3,77 ppm ; un taux nocif pour le cerveau. (Kuepouo, 2017). La prise en compte de l'assainissement préalable de l'eau avant rejet s'impose donc pour la protection des périmètres des ressources en eaux superficielles et souterraines. Les finalités du traitement des eaux résiduaires industrielles sont essentiellement la protection du milieu naturel, le respect des normes de rejet édictées par la législation, la bonne gestion de l'eau en milieu industriel et la réutilisation de l'eau traitée (Touil, 2017). Comment donc pallier à cette pollution industrielle par une réutilisation des eaux usées ? En d'autres termes, comment assurer une meilleure gestion de l'eau en milieu industriel tout en préservant les ressources en eaux de surface et en eaux souterraines ? L'objectif général de cette étude est de faciliter la réutilisation de l'eau en milieu industriel. Les objectifs spécifiques se déclinent comme suit : caractériser les eaux usées industrielles de l'entreprise brassicole ; concevoir un système de traitement adapté ; dimensionner la station de traitement à construire en vue d'une réutilisation dans cette entreprise.

3. Matériels et Méthodes

3.1. Présentation de la zone d'étude

Douala, chef-lieu de la région du Littoral, poumon économique du Cameroun, est une ville estuarienne établie sur les rives du fleuve Wouri. Située à environ 30 km de l'océan Atlantique et à 246 Km de la capitale Yaoundé. La ville de Douala couvre une superficie d'environ 1920 km² avec une population estimée à près de 2 millions d'habitants. Elle est limitée au Nord par le Département du Mounjo, au Nord Est par le département du Nkam, au Sud Est par la rivière Dibamba et au Sud-

Ouest par l'océan Atlantique (Nguedjo, 2011) tel que présenté par la figure 1. Industriellement, Douala occupe le premier rang. Son climat est de type Equatorial humide caractérisé par une pluviométrie moyenne de 4200 mm de pluies par an, une température moyenne annuelle de 26,8 °C et une amplitude thermique de 2,4°C.(Meva'a, 2004). Cette ville est établie sur un ensemble de trois bas plateaux dont les altitudes sont comprises entre 15 et 22 mètres. (Nguedjo, 2011) Le réseau hydrographique de Douala, est constitué par son principal fleuve le Wouri divisant la ville en deux parties et est répartie sur neuf bassins versants hydrographiques majeurs affluents du fleuve Wouri : Bonassama, Besséké, Bobongo, Mgoua, Kambo, Nsapé, Mbopi, Mbanya et Tongo bassa. (Meva'a, 2004). D'après la CUD (2009), sur le plan pédologique, la ville de Douala se situe dans les séries sédimentaires côtières sur le bassin dénommé «bassin sédimentaire de Douala», constitué d'une importante proportion des sols hydromorphes. Ce bassin présente une grande vulnérabilité des nappes aux pollutions : vulnérabilité élevée sur 75% du bassin versant de Besseke (Feumba, 2015).

D'autre part, l'activité industrielle à Douala génère une importante charge (en matières et en bicarbonates) se reflétant dans la turbidité et conductivité de l'eau: 198 à 5890 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité, 168 NTU pour la turbidité et 40,3 mg/l pour l'alcalinité (Kengni et al, 2012). En 1982, Un rapport du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et l'Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel estimaient les polluants marins venant des sources industrielles à 2187 tonnes/an de DBO5 et 48 000 tonnes/an de MES provenant de la ville de Douala. Cette pollution sur des longues périodes compromettra l'exploitation future de la ressource (Feumba, 2015). Notre zone d'étude se limite principalement à la zone Industrielle de Ndokoti, au point de rejet d'une entreprise brassicole y installée.

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

Figure a : Chart of localization of the zone of study

3.2. Prélèvements, échantillonnage et analyses des eaux usées

Les prélèvements et échantillonnages ont été réalisés dans des conditions définies par la norme ISO 5667/2 et le guide des techniques d'échantillonnage. En effet, nos prélèvements ont été faits derrière l'industrie brassicole à Ndokoti au niveau du point de rejet de l'industrie dans l'intervalle horaire de 11 heures à 12 heures pendant 7 jours consécutifs sur le même point. Nous avons prélevé 7 échantillons pour chaque grande classe de mesure (paramètres physicochimiques généraux, DBO₅ et DCO, paramètres microbiologiques) à l'aide d'une perche en bois. Ainsi, nous avons prélevé dans des bouteilles en PEBD de 0,5 ml pour les analyses physicochimiques générales, dans des bouteilles DBO adaptées pour les mesures de DBO et de DCO et dans des bouteilles en verre de 1 litre préalablement stérilisées pour les analyses microbiologiques.

La conservation des échantillons a été faite à 4°C dans une glacière remplie de glaçons depuis le terrain jusqu'au laboratoire. Le transport des échantillons a été fait par motocyclette jusqu'au laboratoire avec une durée maximale de transport de 10 minutes. De manière plus spécifique, nous présenterons la méthode d'analyse de chaque paramètre ainsi que le mode opératoire utilisé.

Détermination du TH

Le T.H indique la qualité douce ou dure d'une eau. La douceur d'une eau est à l'origine du phénomène de corrosion sur les conduites. Il est important de le mesurer aussi bien pour l'entretien de la station que pour un traitement adéquat. Il a été déterminé par la méthode titrimétrique. Cette méthode consiste à utiliser une solution de titre connu pour déterminer la concentration/titre de la solution à analyser.

Détermination du TA

Le T.A précisé dans la norme par la dénomination "bicarbonates" est un paramètre d'une importance majeure pour éviter l'entartrage des conduites mais aussi pour respecter les paramètres organoleptiques de l'eau (incolore). Il a été déterminé par la méthode titrimétrique.

Détermination du TAC

Le T.A.C précisé dans la norme par la même dénomination que le T.A, est également un paramètre d'une importance majeure pour éviter l'entartrage des conduites mais aussi pour respecter les paramètres organoleptiques de l'eau (incolore). Il a été déterminé par la méthode titrimétrique en continuant le dosage du T.A .

Mesure du pH

Le pH est un paramètre incontournable pour le traitement de l'eau : il conditionne une grande partie des procédés des traitements physico-chimiques et biologiques. La mesure du pH a été faite selon la méthode électrochimique à l'aide d'un multimètre (oxymètre et pH-mètre) de marque OAKTON de EUTECH INSTRUMENTS référence P/N 54X002608.

Mesure de la conductivité

La conductivité donne des indices sur la minéralisation d'une eau ou sa charge en ions. Nous l'avons déterminé par la méthode électrochimique à l'aide d'un conductivimètre de Aquapro de HM Digital Model AP-2 de spécifications de mesure allant de 0 à 9999 μS et de résolution 1 μS .

Mesure des TDS

Les sels totaux dissous donnent des indices sur la charge en ions salins d'une eau. En absence d'ions alcalins et d'autres ions, ils se réfèrent à la conductivité. Nous l'avons déterminé par la méthode électrochimique à l'aide d'un TDS-testeur de marque TDS EZ de HM Digital.

- Mesure des TDS :

Après avoir étalonné le TDS testeur, introduire ses électrodes dans la solution dont la conductivité est à déterminer. Le TDS testeur fournira plusieurs valeurs en fonction du temps. La valeur à retenir est celle lue lorsque le TDS testeur sera stabilisé.

Mesure de la DBO₅

La demande biologique en oxygène est un paramètre capital pour le traitement d'une eau. Il caractérise la respiration des microorganismes pendant 5 jours à 20 °C. Nous l'avons déterminé par la méthode électrochimique à l'aide d'un multimètre (oxymètre et pH-mètre) de marque OAKTON de EUTECH INSTRUMENTS référence P/N 54X002608 et des étuves, selon le mode opératoire suivant : Après mesure directe de la teneur en oxygène dissous dans le rejet, nous avons prélevé un échantillon d'eau usée dans une bouteille en verre DBO de 350 ml de contenance de façon à remplir la bouteille. Après incubation pendant 5 jours dans une étuve à 20 °C, nous avons déterminé une fois de plus la teneur en oxygène dissous. La différence de mesure entre l'oxygène dissous initial et l'oxygène dissous après 5 jours est la DBO₅.

Mesure du fer

Le fer est un élément important pour l'homme. Mais en excès, il est responsable de la couleur rouge rouille de l'eau. Nous l'avons déterminé à l'aide d'un spectrophotomètre de marque HM Company DR 900 de référence P/N 93 85 160, S/N 15 24 20 00 10 58 avec ses flacons d'échantillonnage en verre par la méthode colorimétrique. L'élément est mesuré à l'aide d'un spectrophotomètre. Son principe suit la loi de Beer-Lambert.

$$\% \text{ Absorbance} = K \times l \times C \quad (1)$$

avec K constante dépendante du colorimètre, l épaisseur de la cuve de mesure,

C concentration de l'élément à mesurer. »

Mesure du chlore total

Le chlore est un élément très présent dans la nature. Sa détection permet d'apprécier la dose de chlore à ajouter. Nous l'avons déterminé par la méthode colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre de marque HM Company DR 900 de référence P/N 93 85 160, S/N 15 24 20 00 10 58 avec ses flacons d'échantillonnage en verre.

Mesure du phosphore total et de l'azote total

Le phosphore et l'azote sont des éléments responsables de l'eutrophisation des milieux aquatiques. Leur dosage permet de déterminer avec précision la charge polluante de l'eau à éliminer. Nous avons déterminé leurs teneurs par la méthode colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre avec pour réactifs du molybdate d'Ammonium de marque HM Company DR 900 de référence P/N 93 85 160, S/N 15 24 20 00 10 58 avec ses flacons d'échantillonnage en verre.

Analyses microbiologiques

Les analyses microbiologiques concernent principalement les bactéries hétérotrophes mésophiles, les entérocoques, les coliformes totaux et les coliformes fécaux.

Préparation des milieux de culture

Les milieux de culture sont des composés nutritifs spécifiques à chaque microorganisme, permettant la multiplication du microorganisme en colonies. La procédure de préparation des milieux de culture est la suivante :

- Peser la masse nécessaire de milieux de culture pour 200 ml de PCA (11,32 g), pour 200 ml de BEA (40 g) et pour 400 ml d'Endo ; (16 g)
- Dans un grand Erlenmeyer, dissoudre la poudre avec le volume d'eau distillée indiquée.
- Chauffer le mélange à la plaque électrique jusqu'à ébullition.
- Stériliser la préparation dans un autoclave pendant 30 minutes.
- Dans un milieu stérile maintenu sur 15 centimètres par la flamme du bec bunsen, laisser couler la préparation dans des boîtes de pétri.
- Etiqueter chaque boîte en y précisant le nom du milieu de culture. (Gélose)
- Attendre que les milieux se solidifient avant de retourner les boîtes de pétri et les conserver dans un réfrigérateur.

Ensemencement et incubation

L'ensemencement des milieux de culture consiste à introduire les eaux usées dans chaque milieu de culture tandis que l'incubation a pour objectif la multiplication des microorganismes en colonies dans les conditions adéquates de température.

Le mode opératoire est le suivant :

- Dans une enceinte stérile maintenue par un bec bunsen, prélever à l'aide d'une pipette graduée 1 ml d'eaux usées et le verser dans un tube à essai préalablement stérilisé.
- Ajouter 9 ml d'eau distillée et homogénéiser le mélange obtenu à l'aide d'un vortex agitateur de tube. On obtient ainsi une solution diluée d'eaux usées à 10^{-1} .
- À l'aide d'une micropipette, prélever 100 μ l de solution diluée d'eaux usées et le verser dans les boîtes de pétri contenant chacun un des trois milieux de culture.
- Etaler à l'aide de la pipette pasteur.
- Fermer la boîte de pétri et l'étiqueter.
- Une fois terminé, les retourner et les incuber à 37°C pendant 24 heures pour la gélose de PCA, de BEA et la moitié de la gélose d'Endo, et à 44°C pendant 24 heures pour l'autre moitié de la gélose d'Endo.
- Le comptage des colonies se fait après 24 heures à l'aide d'un marqueur à bout pointu.

3.3. Mesure de débit

Pour estimer le débit, nous avons utilisé la méthode du jaugeage au flotteur. Cette méthode ne prend en compte que les vitesses dans la tranche superficielle de l'écoulement, soit environ les 20 premiers centimètres. Le déplacement horizontal d'un flotteur durant un temps t permet de déterminer la vitesse de l'écoulement de surface. L'estimation du débit est obtenue par calcul :

$$Q = \frac{2}{3} V_{max} \times L \times P_m \quad (2)$$

Avec Q (m^3/s); V_{max} (m/s) est la vitesse maximale de surface L (m) est la largeur utile (coulante) P_m (m) est la profondeur moyenne. La profondeur moyenne est obtenue à l'aide d'un limnimètre par mesure à différentes profondeurs de la section considérée.

Traitement des données

Le traitement des données consiste à affiner les données collectées de façon à obtenir les informations pertinentes. Le traitement de nos données a été faite à l'aide du logiciel Microsoft Office Excel 2016 et la définition de la chaîne de traitement a été faite avec le logiciel E_draw max. Les approches de statistique déductive et de calcul hydraulique ont été combinées pour atteindre les résultats voulus. Ces calculs nous ont permis de définir les concentrations moyennes par paramètre

avec des marges d'erreurs (écarts types). Les moyennes des concentrations des différents paramètres ont été déterminées par la formule suivante :

$$\bar{X} = \frac{\sum n_i X_i}{\sum n_i} \quad (3)$$

Où n_i représente le nombre d'occurrence d'une valeur de concentration pour un paramètre donnée X_i représentant cette valeur de concentration et $\bar{X}$ est la concentration moyenne pour le paramètre donné.

L'écart-type permet de renseigner sur les tendances de variation des concentrations pour chaque paramètre donnée. Les formules suivantes ont permis de calculer l'écart type :

$$\sigma = \sqrt{V} \quad (5)$$

$$V = \frac{\sum n_i X_i^2}{\sum n_i} - \bar{X}^2$$

où n_i représente le nombre d'occurrence d'une valeur de concentration pour un paramètre donnée, X_i représentant cette valeur de concentration et $\bar{X}$ la concentration moyenne pour le paramètre donnée, V est la variance de la série statistique et l'écart type de la série statistique de concentration pour un paramètre donné.

3.4. Bases et formules de dimensionnement de la station de traitement

Cette partie présente les formules utilisées pour le dimensionnement de la station de traitement ainsi que les bases de dimensionnement utilisées.

3.4.1. Bases de dimensionnement

Les bases de dimensionnement suivantes dans le tableau 1 ont permis de dimensionner la station de traitement. L'espacement maximal de 3 centimètres permet de retenir au niveau du dégrilleur tout déchet grossier.

Tableau 1 : Bases de dimensionnement de la station de traitement.

Table 1 : Bases of dimensioning of the station of treatment.

Désignations	unités	Valeurs
Prétraitement		
Dégrillage		
Espacement max des barreaux	Centimètres	3
Déshuilage		
Puissance d'aération	W/m ²	50
Traitement secondaire		
Lit bactérien		
Vitesse ascensionnelle	m/h	1,2
Nature du matériau		cloisonyl
Hauteur du matériau	M	2,5
Taux de recirculation	%	50
Décanteur lamellaire		
Vitesse ascensionnelle	m/h	1,4
Hauteur périphérique	M	2,5
Pente du radier	%	5
Traitement tertiaire		
Equilibre calco-carbonique		
Consommation de CO ₂ par °F de bicarbonates	g	8,8
Consommation de lait de chaux par °F de bicarbonates	g	7,4
Désinfection à l'eau de Javel		
Concentration X temps de contact		≥ 20

Le déshuileur agit sous l'action des bulles d'air émises à partir d'un compresseur. Un mouvement de rotation d'un agitateur aide à faciliter la remontée des bulles d'huile. Le lit bactérien traite les eaux avec une dénitrification partielle par l'action du cloisonyl. Le taux de recirculation définit la proportion d'eau traitée qui repassera dans le lit bactérien. La consommation de CO₂ et de chaux sont définies par l'équation-bilan de formation du calcaire.

3.4.2. Formules de dimensionnement

❖ Bassin de déshuilage

Le bassin de déshuilage dans notre chaîne joue deux rôles principaux. Il assure le brassage de l'effluent tel un bassin tampon mais aussi la remontée des huiles à la surface de l'eau. Ses paramètres de dimensionnement sont le volume du bassin, sa surface au sol et la puissance d'aération à fournir pour le déshuilage total.

Le calcul du volume du bassin est défini par la formule suivante :

$$V = \frac{Q_s - Q_e}{t_s} \quad (6)$$

Où V (m^3) est le volume du bassin, Q_s (m^3/s) est le débit de sortie des eaux, Q_e (m^3/s) le débit d'entrée dans le bassin et t_s (in s) le temps de séjour dans le bassin.

La surface au sol du bassin est donnée par la formule suivante :

$$S = \frac{V}{h} \quad (7)$$

Où

V (m^3) est le volume du bassin; S (m^2) la surface du bassin et h (m) la hauteur d'eau dans le bassin majorée d'une revanche de 15 centimètres.

Sur la base de la surface du bassin, la puissance d'aération se calcule par l'expression :

$$P_T (W) = P \times S \quad (8)$$

Où P_T (W/m^2) est la puissance totale d'aération qu'il faut fournir pour un déshuilage total, P la puissance d'aération recommandée par m^2 d'eau usée et S (m^2) la surface au sol du bassin.

❖ Les décanteurs lamellaires

Son principe se base sur celui de la décantation statique avec des améliorations notables. La décantation statique fait appel à la sédimentation de particules dans l'eau sous l'effet de la pesanteur. La théorie de sédimentation obéit à la loi de Stokes (Blazy et al., 2008). Les éléments de dimensionnement sont le volume du décanteur, la surface au sol du décanteur ; la surface d'une lamelle, le nombre de lamelles, la surface de la conduite d'entrée dans le décanteur et son diamètre.

Le volume du décanteur est donné par la formule :

$$V = \frac{Q_s - Q_e}{t_s} \quad (9)$$

Où V est le volume du décanteur, Q_s (m^3/s) est le débit de sortie des eaux, Q_e (m^3/s) le débit d'entrée dans le décanteur et t_s (s) le temps de séjour dans le décanteur.

La surface du décanteur est proportionnelle à son volume et se calcule par cette formule :

$$S = \frac{V}{h} \quad (10)$$

Où V (m^3) est le volume du décanteur; S la surface du décanteur et h (m) la hauteur d'eau dans le décanteur majorée d'une revanche de 15 centimètres.

La surface d'une lamelle dépend étroitement de la surface au sol du décanteur ainsi elle sera inférieure à celle-ci. Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_L = L_L \times l_L \quad (11)$$

où S_L (m^2); L_L (m) est la longueur de lamelles et l_L (m) la largeur de lamelles. Du fait de ce calcul, le nombre de lamelles se déduit facilement par cette formule de Blazy et al., 2008 :

$$n_T = \frac{Q}{U_H \times S_L \times \cos \alpha} \quad (12)$$

Où S_L (m^2) est la surface d'une lamelle et U_H (m/s) la vitesse limite de décantation variant avec le nombre de lamelles, α représente l'angle d'inclinaison des lamelles avec l'horizontale et Q (m^3/s) le débit de la suspension ou débit d'entrée dans le décanteur. La surface et le diamètre de la conduite d'entrée dans le décanteur sont donnés par les formules :

$$S_e = \frac{Q}{\sqrt{h}} \quad (13)$$

Où S_e (m^2) est la surface d'entrée dans le décanteur, h ($\frac{m}{s}$) la perte de charge à l'entrée du décanteur en une seconde et Q (m^3/s) le débit d'entrée dans le décanteur.

$$\phi = \sqrt{\frac{4 \times S_e}{\pi}} \quad (14)$$

Où S_e (m^2) est la surface d'entrée dans le décanteur et ϕ (m) le diamètre de la conduite d'entrée.

❖ Le lit bactérien

Il s'agit d'un procédé d'épuration biologique aérobie. L'épuration de la phase liquide repose sur la biodégradation de la matière organique en présence d'oxygène. Le temps de passage de l'eau au sein du système est très court, de l'ordre de quelques minutes (Racault et Seguret, 2004). Ses éléments de dimensionnement sont la surface de la conduite d'entrée, le diamètre de cette conduite, la surface horizontale du lit et la force d'irrigation à utiliser.

La surface de la conduite d'entrée dans le lit bactérien est donnée par l'expression

$$S_e = \frac{Q}{\sqrt{h}} \quad (15)$$

Où S_e (m^2) est la surface d'entrée de l'asperseur, h (m/s) la perte de charge à l'entrée de l'asperseur en une seconde et Q (m^3/s) le débit d'entrée dans l'asperseur.

Le diamètre de cette conduite se calcule par la formule :

$$\phi = \sqrt{\frac{4 \times S_e}{\pi}} \quad (16)$$

Où S_e (m^2) est la surface d'entrée dans l'asperseur et ϕ (m) le diamètre de la conduite d'entrée.

La surface horizontale du lit se détermine par l'expression :

$$A = \frac{Q \times (1+R)}{Ch} \quad (17)$$

(Racault et Seguret, 2004)

Où Q (m^3/h) est le débit d'entrée dans le lit bactérien, R le taux de recyclage des eaux traitées et Ch (m/h) la charge hydraulique imposé au lit bactérien.

La force d'irrigation assurée par les bras de l'asperseur est donnée par la formule :

$$SK = \frac{1000 \times Ch}{60 \times a \times n} \quad (18)$$

(Racault et Seguret, 2004)

Où SK ($mm/tours$) est la force d'irrigation imposée dans le lit bactérien, a le nombre de tours par minutes d'aspersion, n le nombre de bras de l'asperseur et Ch (m/h) la charge hydraulique imposé au lit bactérien.

❖ Digesteur anaérobie

Ce procédé de digestion donne une issue de méthanisation des boues de la station de traitement. Ses principaux éléments de dimensionnement sont le volume du biodigester et sa surface au sol.

Le volume du biodigester se déduit de la formule suivante :

$$V = \frac{Q_b}{t_s} \quad (19)$$

Où Q_b (m^3/s) est la quantité de boues produites pendant un période égale au temps de séjour des boues et t_s (s) le temps de séjour des boues dans le biodigester.

La surface du biodigester est déduite du volume par l'expression :

$$S = \frac{V}{h} \quad (20)$$

Où V (m^3) est le volume du biodigester et h (m) la hauteur des boues après une période égale au temps de séjour.

❖ Bassin de désinfection

Il assure le traitement microbiologique des eaux à l'eau de javel. Les éléments à dimensionner sur ce bassin sont le volume du bassin et le débit d'injection de l'eau de javel. Le volume du bassin se déduit de la formule suivante :

$$V = \frac{Q_h}{t_c} \quad (21)$$

où V (m^3) est le volume du bassin, t_c (h) le temps de contact avec l'eau de javel et Q_h (m^3/h) le débit d' eau à traiter. Le débit d'injection se calcule par la formule :

$$Q_{mh} = \frac{T_x \times Q_h}{3,17 \times T} \quad (22)$$

Où Q_{mh} (l/h) est le débit d'injection, T_x (g/m³) le taux de traitement avec l'eau de javel, T (g/l) la teneur en chlore de l'eau de javel et Q_h (m³/h) le débit d'eau à traiter.

4. Résultats et Discussion

Les caractéristiques physicochimiques et microbiologiques sont des éléments essentiels pour la conception d'une station de traitement d'eau. Les analyses physico-chimiques et microbiologiques nous ont permis d'avoir les différentes caractéristiques de nos eaux usées.

4.1. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des eaux.

Les caractéristiques physico-chimiques de nos eaux usées portaient sur 15 paramètres principaux dont la conductivité, les sels totaux dissous, la température, le pH, les phosphates, le chlore total, le fer, l'azote total, le calcium, le magnésium, la DBO₅, la DCO, les matières en suspension, les ions hydrogénocarbonates et les ions bicarbonates. Le tableau 2 montre les résultats des analyses physicochimiques :

Tableau 2 : Résultats des analyses physico-chimiques.

Table 2 : Results of the physicochemical analyses.¶

Paramètre physico-chimique	Valeur moyenne
Température (°C)	23,87 ± 5,22
pH	6,50 ± 1,83
Potentiel rédox (mV)	43,39 ± 15,59
Conductivité à 25°C (µs/cm)	1734,86 ± 409,35
TA (°F)	10,40 ± 14,33
TAC (°F)	32,63 ± 24,52
TH (°F)	1,89 ± 0,44
Calcium (mg/l)	3,77 ± 0,89
Magnésium (mg/l)	3,77 ± 0,89
TDS (ppm)	805 ± 205,90
Fer Total (mg/l)	1,76 ± 2,19
Phosphore Total (mg/l)	60,09 ± 14,42
Chlorure Total (mg/l)	0,06 ± 0,03
Hydrogénocarbonates (mg/l)	158,25 ± 227,81
Bicarbonates (mg/l)	117,94 ± 171,61
Azote total (mg/l)	57,16 ± 2,63

DBO ₅ (mg/l O ₂)	466,43 ± 62,36
DCO (mg/l O ₂)	1082 ± 52,91
MES (mg/l)	204,71 ± 35,15

Les différents résultats montrent une forte variation des caractéristiques physicochimiques de l'eau au fil du temps. L'écart-type de la température de 5,22 °C, met en évidence la pollution thermique causée par les eaux usées. L'écart-type du pH de 1,83, met en exergue les variations tantôt acides tantôt basiques du pH, ceci peut s'expliquer par les variations des titres alcalimétriques perceptibles par les écarts-types du T.A et du T.A.C respectivement de 14,33 °F et de 24,52 °F. La valeur moyenne du titre hydrotimétrique de 1,89 °F comprise dans la marge de 0 à 5 °F, met en exergue le caractère très doux de ces eaux. Nous constatons également des variations de phosphore perceptibles par l'écart-type par rapport à la moyenne du phosphore de 14,42 mg/l. Il proviendrait des eaux de fabrication brassicole car très riches en ortho-phosphates Des fortes variations sont constatées pour le fer et les bicarbonates avec des écarts-types respectifs de 2,19 mg/l et 171,61 mg/l. Ces variations s'expliqueraient par la présence dans les eaux de rejet des eaux de nettoyage et de rinçage. Il en résulte une source potentielle de pollution des eaux souterraines en fer et en carbone organique à partir des versants, qui s'ajoute à celles chimiques et biologiques mises en évidence par d'autres auteurs dans l'agglomération de Douala (Assonfack, 2002 ; Baok, 2007 ; Djuikom et al., 2009; Kengni et al, 2012 ; Ketchemen-Tandia et al., 2004 ; Ndjama et al., 2008 ; Temgoua et al., 2009). La valeur moyenne de fer de 1,76 ± 2,19 mg/l est concordante à celles obtenues par Oumar et al, 2014 sur le lac Bini et par Aboubakar et al., 2017 au environs d'une société agro-industrielle. L'écart-type sur la concentration de fer montre néanmoins que certaines valeurs de fer sont supérieures à celles obtenues par celui-ci. Cela s'explique par la forte activité de production brassicole en zone urbaine.

Les valeurs de conductivité et TDS montrent que nos eaux usées sont très chargées en ions aussi bien salins (Sodium, potassium) que d'autres ions. Ces résultats confirment les résultats de Ebang et al., 2012 et de Kengni et al, 2012 sur les effluents industrielles et domestiques polluants le Mfoundi et le zone industrielle de Douala-Bassa. Les fortes valeurs de DBO et DCO révèlent la présence d'une pollution organique responsable de la forte minéralisation de l'effluent. Les valeurs de pH et de nitrates obtenues respectivement de 12,04 et de 9 mg/l sont très différentes de celles obtenues dans une autre entreprise brassicole de Douala par Kapsu, 2014. Cet écart s'explique par le procédé de fabrication de la bière et le produit brassicole voulue. Cependant, le pH basique et par moment supérieur à celui des eaux naturelles (6,6 à 7,6) indique clairement une pollution.

Les variations des paramètres physico-chimiques analysés imposent la nécessité d'un bassin tampon dans la conception de la station de traitement.

Les principaux paramètres microbiologiques énoncés dans les normes sont les coliformes totaux et les coliformes fécaux. Cependant, nous avons étendu notre analyse aux entérocoques (streptocoques fécaux) et aux bactéries aérobies hétérotrophes mésophiles comme le présente le tableau 3.

Tableau 3 : Résultats des analyses microbiologiques.

Table 3 : Results of the microbiological analyses.¶

Paramètre microbiologique	Valeur moyenne
Entérocoques (x 10 ⁴ UFC/100 ml)	176,40 ± 393,32
Coliformes totaux (x 10 ⁴ UFC/100 ml) 37°C	677,40 ± 579,81
Coliformes Fécaux (x 10 ⁴ UFC/100 ml) 44°C	99,40 ± 59,45
Bactéries aérobies hétérotrophes mésophiles (x 10 ⁴ UFC/100 ml)	541,40 ± 281,75

La présence des bactéries aérobies hétérotrophes mésophiles montre une certaine oxygénation des eaux usées et la possibilité d'opérer un traitement biologique. Par contre, la présence des entérocoques et des coliformes fécaux laisse croire à une contamination fécale des eaux usées avant rejet. Ceci pousse à s'intéresser sur les sources exactes d'une telle contamination et la gestion des excréta en industrie. La présence des coliformes suppose le mélange des eaux de douches avec d'autres types d'eaux usées en industrie avant rejet. (Boeglin et Roubaty, 2008)

4.2. Chaîne de traitement et des procédés applicables

Cette comparaison avec les normes de rejet permet de mieux ressortir tous les polluants principaux présents dans les eaux usées tel que présenté dans le tableau 4.

Tableau 4 : Moyennes par paramètres et comparaison avec la norme de rejet.

Table 4 : Averages by parameters and comparison with the standard of rejection.

Paramètre	Valeur moyenne	Norme de rejet
Elévation de Température (°C)	5,22	≤ 3°C
pH	6,5	6-9
MES (mg/l)	204,71	50
Phosphore Total (mg/l)	60,08	5
Azote total (mg/l)	57,16	10
DBO ₅ (mg/l O ₂)	466,43	50
DCO (mg/l O ₂)	1082	250
Coliformes et bactéries (10 ⁴ UFC)	1318,2	400 NPP/100 ml

La valeur moyenne de pH est dans la norme, ceci n'est pas le cas pour la valeur moyenne de phosphore total, l'azote total, la DBO5 et la DCO. Ces valeurs s'expliquent la forte présence de la

matière organique dans les effluents brassicoles. Il en est de même pour les effluents vinicoles (Racault Y. et al., 2002) à Bordeaux se caractérisant par des fortes concentrations en matières organiques. Les valeurs moyennes de population bactérienne (coliformes et bactéries) et l'élévation de température également sont au-dessus de la norme de rejet des eaux usées brassicoles. Ces paramètres hors norme provoquent divers types de pollutions dont la pollution organique, toxique, thermique, azotée et phosphorée avec pour conséquences environnementales directes les troubles de reproduction, la mort des poissons par asphyxie et à long terme de l'envasement du cours d'eau entre autres. Sur l'homme, la pollution azotée provoque la maladie du bébé bleu en cas de consommation des eaux contaminées par les effluents. (Boeglin et Roubaty , 2008). Les impacts environnementaux d'un tel rejet d'effluent sont non négligeables d'où la proposition d'un procédé de traitement pour la réutilisation des eaux.

4.3. Station de traitement

4.3.1. Débits d'eaux usées

Les débits d'eau sont un paramètre très important pour le dimensionnement. Ces débits permettent de déterminer les dimensions de la station mais aussi les consommations en produits de traitement. Le Tableau 5 suivant récapitule les valeurs obtenues après mesure des débits.

Tableau 5 : Valeurs de débits d'eaux usées obtenues.

Table 5: Values of wastewater flows obtained.

	Longueurs parcourues (m)	Largeurs (m)	Profondeurs (m)	Temps (s)	Vitesse (m/s)	Débit (m ³ /s)
Mesure 1	1,97	1,85	0,46	8,108	0,243	0,173
Mesure 2		1,9	0,33	8,383	0,235	0,172
Mesure 3		1,87	0,38	8,292	0,237	0,171
Mesure 4		1,8	0,37	7,275	0,271	0,187
Max						0,187

Le débit maximal trouvé est de 0,187 m³/s soit 676 m³/h. Un très grand débit justifié par l'usage important de l'eau dans l'industrie brassicole. Ce débit implique la conception d'une station de dimensions assez importantes d'où la nécessité d'un espace disponible correspondant ou des procédés de traitement de moindre emprise foncière. La surface disponible mesurée sur Google Earth est de 1000 m².

Au vu de la qualité des eaux usées, un traitement poussé est adéquat. La Figure 2 présente le schéma

Figure 2: Synoptique de la station de traitement.

Figure 2 : Synoptic of the station of water treatment.

synoptique de la station avec les installations associées.

4.4. Processus de traitement.

Cette chaîne de traitement permet à chaque niveau d'enlever voire éliminer un type d'élément polluant dans le traitement. L'étape de dégrillage est importante principalement pour limiter les défaillances lors de la chaîne de traitement. L'espace entre les barreaux du dégrilleur a été déterminé en fonction de la taille de la plus petite particule grossière susceptible de passer à travers le dégrilleur (stylos et plastiques).

Le brassage au niveau du déshuileur est effectué par un agitateur mécanique combiné à une aération forcée pour la remontée des bulles d'huiles. L'injection de lait de chaux permet de remonter le pH lorsqu'il est très acide pour faciliter le traitement biologique. Ce procédé a une utilité particulière pour l'élimination des huiles difficilement digestibles.

Le décanteur lamellaire est le prochain point de traitement sur la chaîne. D'après la loi de Stokes, les matières en suspension assimilables aux argiles mettraient 2 heures de décantation (Dégrémont, 1989). Par contre, l'utilisation des procédés de coagulation-floculation demande un usage de fortes quantités de produits car l'augmentation de la dose de coagulant facilite l'obtention de faibles turbidités et donc la décantation rapide des particules (Touil, 2017). La décantation lamellaire présente un avantage double : celui de multiplier la vitesse de décantation des particules avec un temps de sédimentation réduit (Blazy et al., 2008) et une économie de coût sur l'usage des coagulants et floculants. L'injection du permanganate de potassium permet de neutraliser le sulfure d'hydrogène (inhibiteur de l'action épuratrice des microorganismes) détectable par le potentiel rédox inférieur à 100 mV EHN des eaux usées (Canler, 1993). L'acide éthanoïque permet un retour des eaux à un pH légèrement acide pour la digestion anaérobie (6,8 à 7,2) en cas de forte basicité des eaux (Gay, 2008).

Le choix du procédé " lit bactérien " comme traitement secondaire est justifié par le fait qu'il ne demande pas de grands espaces ($0,3 \text{ m}^2/\text{EqH}$ de pollution), il est facilement maintenable à condition qu'il soit précédé d'un traitement primaire et ses performances épuratoires de réduction peuvent aller jusqu'à 97% DCO, 99% MES, 76% turbidité. (Sahouli, 2012). Le type de garnissage à cloisonyl $\varnothing 80$ permet une nitrification partielle des effluents avec un lit bactérien à très forte charge [0,5 à 3,5 m/h et plus] (Racault et Seguret, 2004).

L'étape de biodigestion est importante pour la gestion des boues d'épuration. Les injections précédentes de chaux permettent d'atteindre une condition d'optimisation de la méthanisation (TAC compris entre 1500 et 6500 mg de CaCO_3/l de boues) pour un temps de séjour dans le biodigester allant de 20 à 30 jours à 40°C (Gay, 2008).

Le second décanteur lamellaire diminue la charge résiduelle en MES et permet d'atteindre une turbidité inférieure à 5 NTU en désinfection. Les injections de chaux et de CO₂ avant le décanteur constitue le traitement de cette eau pour le retour à l'équilibre calco-carbonique.

La désinfection achève le traitement des eaux usées avec une destruction des microorganismes pathogènes. Le taux d'injection d'eau de javel a été défini par rapport à la norme OMS de 0,5 g/m³ pour une désinfection efficace.

Ladite station aura les composantes et dimensions consignées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Composantes de la station de traitement (traitement primaire).

Table 6: Components of the station of treatment (primary treatment). ¶

Composante	Spécifications conceptuelles	Dimensions
Dégrilleur	Espacements entre les barreaux (cm)	0,50
	Hauteur du bassin (m)	3,00
Déshuileur	Côté du bassin (m)	4,74
	Puissance totale d'aération (KW)	3,37
	temps de séjour (min)	6,00
	Angle d'inclinaison (°)	45,00
	Longueur lamelle (m)	4,00
	Largeur lamelle (m)	4,00
	Surface lamelle (m ²)	16,00
	Vitesse de décantation (m/h)	15,00
Décanteur lamellaire	Nombre de lamelles	5,00
	Coté du décanteur (m)	5,00
	Espacement lamelle (m)	1,00
	Volume de boues (m ³ /h)	375,00
	Temps de séjour (h)	0,25
	hauteur du décanteur (m)	6,75
	perte de charge à l'entrée (cm)	15,00
	surface de la conduite d'entrée (cm ²)	3,00
	diamètre d'entrée (cm)	1,95

Nous recevrons uniquement dans notre station les colloïdes et les matières en suspension. La présence des décanteurs lamellaires dans notre station multipliera la vitesse de décantation des particules par 12 en moyenne d'après Blazy et al (2008). Les performances épuratoires du décanteur (élimination de 30 % de DBO 5 et de 50 à 80 % de MES) seront améliorées (Alexandre, 1997). Concernant le lit bactérien, l'adoption d'une force d'irrigation comprise entre 50 et 500 mm par tour et d'un garnissage de type plastique cloisonyl nous permettra d'atteindre les meilleures performances du lit bactérien (Elimination de 60 à 80 % de DCO, 80 % de DBO5, 40 % de NTK et 20 % de Phosphore)

(Racault, 2002 ; Racault et al, 2004 ; SATESE, 2008). Particulièrement la nitrification sera doublée (Racault et al, 2004). Par contre, le taux de recyclage de la station fixée à 50 % permettra d'améliorer la qualité de l'eau à la sortie du lit bactérien (Dehbi, 2015).

Tableau 7 : Composantes de la station de traitement (traitement secondaire).

Table 7 : Components of the station of treatment (secondary treatment).

Composante	Spécifications conceptuelles	Dimensions
Lit bactérien	Hauteur du lit (m)	2,50
	Nature du lit	Cloisonyl
	Charge hydraulique (m/h)	33,78
	Vitesse ascensionnelle (m/h)	1,20
	Taux de recyclage (%)	50,00
	nombre de bras de l'asperseurs	4,00
	Nombre de tours/min	10,00
	Force d'irrigation (mm/trs)	56,29
	Surface du lit (m ²)	30,00
	diamètre du lit (m)	6,18
	Angle d'inclinaison (°)	45,00
	Longueur lamelle (m)	4,00
	Largeur lamelle (m)	4,00
	Surface lamelle (m ²)	16,00
	Vitesse de décantation (m/h)	15,00
Décanteur lamellaire	Nombre de lamelles	4,00
	Coté du décanteur (m)	5,00
	Espacement lamelle (m)	1,25
	Volume de boues (m ³ /h)	375,00
	Temps de séjour (h)	0,25
	hauteur du décanteur (m)	6,76
	perte de charge à l'entrée (cm)	15,00
	surface de la conduite d'entrée (cm ²)	3,00
	diamètre d'entrée (cm)	1,95

La présence du traitement tertiaire permettre une désinfection totale de l'eau au pH de 7,5 avec un taux de traitement de 0,5 g/m³ peu supérieure à la norme OMS pour une désinfection efficace.

Tableau 8 : Composantes de la station de traitement (traitement tertiaire).

Table 8: Components of the station of treatment (tertiary treatment).

Composante	Spécifications conceptuelles	Dimensions	
Equilibre carbonique	Consommation horaire de CO ₂ (Nm ³ /h)	22,71	
	Consommation horaire de lait de chaux (kg/h)	37,51	
	Stockage journalier de CO ₂ (Nm ³ /j)	227,11	
	Stockage journalier de chaux (kg/j)	375,14	
	Taux de traitement (g/m ³)	0,65	
	Débit horaire à injecter (l/h)	11,54	
	Hauteur de la bâche de désinfection (m)	6,00	
	Longueur de la bâche de désinfection (m)	11,00	
	Largeur de la bâche de désinfection (m)	10,24	
		m	m
Désinfection à l'eau de javel à 12°		in	ax
	Débit de la pompe doseuse (l/h)	5,77	2,09
	Volume de stockage pour 3 jours (l)	346,31	
	Volume de boues par heure (m ³ /h)	138,30	
	Volume du digesteur pour 1 jour (m ³)	1382,98	
Digesteur	Quantité de biogaz produit (Nm ³)	1106,39	

À la sortie de notre station, nous attendons une eau de DBO₅, DCO, MES et Azote respectivement inférieures à 25 mg/l, 90 mg/l, 10 mg/l et 5mg/l : une eau réutilisable pour les besoins mineurs de l'industrie.

5. Conclusion

L'objectif de notre étude était de caractériser les eaux usées d'une industrie agricole et de concevoir une station de traitement en vue d'une réutilisation de ces eaux. La station de traitement conçue a 7 unités pour un traitement poussée permettant de recycler près de 676 m³ d'eau non potable par heure pour un taux de réutilisation de 100%. Son coût d'investissement calculé par la méthode empirique est de 370 000 000 F cfa Hors taxes. Par contre, les taxes d'assainissement à payer pour la même charge polluante s'élèvent à 1 128 100 000 Fcfa. La mise en place de telles stations de traitement des eaux usées à des fins de réutilisation pour les usages mineurs en entreprise constitue une solution

durable pour la gestion de la ressource en entreprise avec un impact important sur la rentabilité économique de l'entreprise.

6. Bibliographie

Aboubakar . (2017) Caractérisation des eaux de surface aux alentours d'une société agro-industrielle de Maroua-Cameroun. Larhyss Journal n°29. 17 p.

Agence de l'eau de Rhin-Meuse. (2007) Procédés d'épuration des petites collectivités du Bassin de Rhin-Meuse. 173 p

Alexandre O. (1997). Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités. Ministère de l'agriculture et de la pêche. 96 p.

AMCOW. (2011). Approvisionnement en eau potable et assainissement au Cameroun. Traduire les financements en services à l'horizon 2015 et au-delà. 32 p

BAD. (Mai 2010) Rapport d'évaluation de projet, Projet d'alimentation en eau potable et d'assainissement en milieu rural pays : Cameroun.

Baok G. (2006). Pollution des eaux de rivières et impact sur les populations riveraines : Cas de la rivière Mgoua dans la zone industrielle de Douala-Bassa. « Mémoire Online »

Blazy. (2008). Décantation. Equipements et procédés. Edition Techniques de l'ingénieur, traité génie des procédés.12p.

Boeglin J.C. (2008). Pollution industrielle de l'eau : Caractérisation, classification, mesure. Editions Techniques de l'Ingénieur 12 p.

Boeglin J.C. (2008.). Lutte contre la pollution de l'eau : Inventaire des traitements. Editions Techniques de l'Ingénieur.12 p.

Canler J.P. (1993). Dysfonctionnements biologiques des stations d'épuration : origines et solutions. GIS-BIOSTEP. Ministère de l'agriculture et de la pêche. 59 p.

Canler J.P. (2012).Évaluation, optimisation et modélisation de filières de traitement : cas du procédé à cultures fixées fluidisées (MBBR). Sciences Eaux and Territoires : la Revue du IRSTEA, IRSTEA , p. 16 - p. 23. <hal-00772830>

Charte Qualité. Micro-station à culture fixée aérée. Assainissement non collectif dans l'Eure. 1 p.

Chekkouri S. & Ahlafi A. (2013). Qualité des eaux de baignade en méditerranée. Institut de Prospective Economique du Monde Méditerranéen. page 8

Conseil général Seine-et-Marne. (2008). Fiche Technique sur l'assainissement collectif n°7 : La filière Filtration Membranaire ou Bioréacteur à membrane.

Dang V. Etat des lieux et mesures de réhabilitation des points d'eaux modernes dans la commune de Mvangan, région du Sud-Cameroun. 86 p.

Dehbi. (2015). Etude comparative des performances d'un lit bactérien à garnissage en pouzzolane de Beni Saf et d'un lit bactérien à garnissage plastique. Université de Tlemcen-Algérie. 195 p.

Defo C. (2006). Gestion des boues de vidange en milieu urbain au Cameroun : CSA de la ville de Bafoussam. « Mémoire Online ». Thèse de Master of Science, Université de Dschang.

Defo C. (2015). Collecte et évacuation des boues de vidange dans la ville de Bafoussam-Cameroun. 23 p. Vertigo. Vol. 15. n°1.

Defo C. (2016). Current conditions of groundwater resources development and related problems in republic of Cameroun. (p43-p63). European Water Publications. 10 p.

Delaat et Branchet. (2017). Etude comparative des procédés d'oxydation avancée UV/Chlore et UV/H₂O₂. Revue des sciences de l'eau Volume 30, number 1. 7p

Dibong S. et Ndouongo G. (2014) Inventaire floristique et écologique des algues des rivières Kambo et Longmayagui de la zone humide de Douala (Cameroun). International Journal of Biological and Chemical Sciences 8(6) : 2560 -2577. 18 p.

Direction nationale de l'eau potable et de l'assainissement. (2013). Procédés de désinfection et postes de dosage. 32 p.

Djelal H. Les effluents industriels et leurs traitements. Management et Avenir 2008/6 n°20 (p275-p288).

Draut-Pezard C. Eaux usées industrielles : recycler et réutiliser pour moins rejeter. Revue « L'eau, L'industrie et Les nuisances » numéro 355. (www.revue.ein.com.)

Ebang. (2012). Bio-écologie des diatomées épilithiques de la rivière Mfoundi (Yaoundé, Cameroun) : Diversité, distribution spatiale et influence des pollutions organiques. Revue des sciences de l'eau Volume 25 n°3. 17 p.

El Guamri. (2007). Etude physico-chimique et parasitologique des eaux usées destinées à l'irrigation du périmètre péri-urbain de Fouarat (Kenitra, Maroc). 11 p

FAO. (2003) Irrigation avec les eaux usées traitées : Manuel d'utilisation. 73 p.

FAO (2012) Aquastat, FAO's global information system on water and agriculture. (www.fao.org/nr/Aquastat.)

Feumba R. (2015). Hydrogéologie et évaluation de la vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de Besseke (Douala-Cameroun). 253 p.

Futura-sciences. Recyclage des eaux usées. [http:// futura-sciences.com](http://futura-sciences.com) consulté le 19/04/18.

INS (2013). Annuaire statistique du cameroun. 536 p.

INS (2015). Annuaire statistique du cameroun. 438 p.

Kapsu T. (2014). Analyse de la toxicité des effluents industriels et risques de santé : Cas des trois industries de la ville de Douala au Cameroun. Université Du Dahomey. 14 p.

Kouam. (2006). Gestion intégrée des ressources en eau et objectifs du millénaire pour le développement en Afrique : Cas du Cameroun. Vertigo vol 7 n°2. 10 p.

Kuepouo G. (2017). Pollution par le mercure au Cameroun. 2 p.

Les agences de l'eau. (2013). Fiche pays : Cameroun. 1 p.

LombriTek éco-innovation. (2009). La Lombri-station : nouveau procédé pour le traitement écologique des eaux usées, sans production de boues d'épuration en utilisant des vers de terre (lombriciens). 7 p.

Ndzié Z. (2013). Pollution industrielle et Agriculture périurbaine dans une métropole tropicale: Cas de l'entrée Sud de la ville de Yaoundé (Cameroun). 11 p.

Nguedjio P. (2011). Géomatique et analyse de l'assainissement et des risques sanitaires en milieu urbain : Cas du bassin versant versant de Mbanya dans la ville de Douala (Cameroun). « Mémoire

Online »Marsault F. et al. (2012-2013). Traitement et valorisation des eaux usées : Exemple de la station de lagunage de Rochefort. CERES-ERTI

Meunier J. inc. (2011). Réacteur biologique à support fluidisé avec garnissage K3 d'AnoxKaldnes.15 p.

Mission départementale d'assistance à la gestion de l'Eau. (2007) Stations d'épuration des petites collectivités. Conseil général Loire en Rhône-Alpes.56 p. (www.loire.fr).

Ministère de l'environnement et de la protection de la nature. (2011). Normes environnementales et procédure d'inspection des installations industrielles et commerciales au Cameroun. (p 36-p47).

Ministère de l'économie, de la planification et de l'aménagement du territoire (2009). Document de stratégie pour la croissance et l'emploi.174 p

Ministère de l'économie, de la planification et de l'aménagement du territoire. (2010). Rapport National OMD. 55 p.

Mpakam.(2006). Etude des facteurs de pollution des ressources en eau en milieu urbain : Cas de bafoussam (Ouest-Cameroun).27 p.

OMS, FAO & PNUE. (2006) Directives OMS pour l'utilisation sans risques des eaux usées, excréta et des eaux ménagères en Agriculture. Volume II. (p.227 et p.229).

Patry B. (2016). Étude de la séparation solide-liquide de l'effluent d'un réacteur biologique à culture fixée.

Rodier J. et coll. (2009). L'analyse de l'eau , 9^{ème} édition. DUNOD. 1579 p.

Racault Y. (2002). Les effluents vinicoles : problématique du traitement et premier bilan sur la conception et le fonctionnement des procédés biologiques. Journal « Ingénieries n°32 p 13-p26 ».

Racault Y. (2004). Elements de conception et de dimensionnement des lits bactériens. Cemagref Bordeaux.18p.

SATESE. (2008) Filières d'épuration pour les petites collectivités. 60 p.

Touil S. (2017). Optimisation du traitement physico-chimique des eaux d'encre. Revue des Energies Renouvelables vol 20 n°3 : 415-422. 8 p.

UN-Water. (2018).Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau
.12 p.

www.techniques-ingénieur.fr, consulté le 23 juin 2018