

Sommaire

LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	i
LISTE DES TABLEAUX	ii
LISTE DES FIGURES.....	ii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
1. La pollution des eaux usées	3
1.1. Introduction	3
1.2. Les principaux polluants des eaux.....	4
1.3. Normes marocaines pour les rejets indirects	8
2. Les principaux types de traitement des eaux usées	8
2.1. Épuration par cultures libre	9
2.2. Épuration par filtres à sable	9
2.3. Épuration par lagunages	9
3. Biodégradabilité des rejets	10
CHAPITRE 2 : PARTIE EXPÉRIMENTALE	11
1. Présentation de l'installation de traitement	12
1.1. Les éléments de l'ouvrage	14
1.2. Origines des l'effluents à traiter au sein de la CBGS	23
2. Échantillonnage	24
3. Analyse des échantillons	24
3.1. Les mesures des paramètres physico-chimiques de la STEP	24
3.2. Le polyélectrolyte.....	27
4. Méthodologie des plans d'expérience	28
4.1. Stratégie dans le choix des méthodes d'expérimentation.....	29
4.2. Méthode de surface de réponse	30
4.3. Les types de matrices de surface de réponses.....	31
4.4. Plans composites centrés	31
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	33
1. Diagnostique de la STEP	34
2. Suivi des paramètres et calcul du rendement	35
3. Optimisation de la dose du polyélectrolyte et du pH.....	37
3.1. Analyse des résultats et les effets des facteurs sur l'abattement de la DCO	38
3.2. Analyse des résultats et les effets des facteurs sur l'abattement de la MES.....	41

3.3. Conclusion :.....	44
4. Ajustement du ratio C/N/P	44
5. Augmentation du taux de recirculation	46
6. Ajustement : ratio C/N/P et taux de recirculation.....	47
7. Taux d'abattement des différents paramètres.....	48
CONCLUSION GENERALE.....	51

LISTE DES ABRÉVIATIONS

DCO : Demande Chimique en Oxygène (mg O₂/L)

DBO₅ : Demande Biologique en Oxygène en cinq jours (mg O₂/L)

MES : Matières En Suspensions (mg/L).

COT : Carbone organique total (ppm C).

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

PCB : Polychlorobiphényles.

V₃₀ : volume de boue décantée au bout de 30 minutes.

Nt : Azote total.

Pt : Phosphore total.

UV : Ultra-violet

NTK : Azote Total Kjeldahl

CL50 : Concentration Létale pour 50% des individus présents.

O_x : Oxyde.

Uij : Variable naturelles (plan d'expérience).

Uo : la valeur au centre en unité courante

Xij : Variable codées sans dimension (plan d'expérience).

N (Chap.2) : Nombre d'expériences.

k (Chap.2) : Nombre de facteurs.

[Poly] : Concentration du polyélectrolyte.

R.DCO : Rendement de DCO en %.

R.MES : Rendement de MES en %.

Q : Débit hydraulique moyen (m³/h).

Cv : Charge volumique (DCO/j/m³).

Ts : Temps de Séjour hydraulique.

IB : Indice de Boue.

C/N/P : Carbone / Azote / Phosphore.

ANOVA : **A**Nalyse **O**f **V**ariance.

R² et R²A : des coefficients de la qualité d'ajustement du model (plan d'expérience).

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : NORMES MAROCAINES POUR LES REJETS INDIRECTS	8
TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DU PROBLEME.....	32
TABLEAU 3 : DOMAINE EXPERIMENTAL	32
TABLEAU 4 : REPONSE(S) EXPERIMENTALE(S).....	32
TABLEAU 5 : LES PARAMETRES TECHNIQUES DE LA STEP	34
TABLEAU 6 : SUIVI DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA STEP.....	35
TABLEAU 7 : TAUX D'ABATTEMENTS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE AVANT L'OPTIMISATION	36
TABLEAU 8 : MATRICES D'EXPERIENCES.....	37
TABLEAU 9 : LES COEFFICIENTS DU MODELE	38
TABLEAU 10 : ESTIMATIONS ET STATISTIQUES DES COEFFICIENTS : REPONSE Y1 : R.DCO	38
TABLEAU 11 : LES COEFFICIENTS DU MODELE	39
TABLEAU 12 : TABLEAU DES RESIDUS : REPONSE : R.DCO.....	39
TABLEAU 13 : ANALYSE DE LA VARIANCE : REPONSE Y2 : R.MES	41
TABLEAU 14 : ESTIMATIONS ET STATISTIQUES DES COEFFICIENTS : REPONSE Y2 : R.MES	41
TABLEAU 15 : LES COEFFICIENTS DU MODELE	42
TABLEAU 16 : TABLEAU DES RESIDUS : REPONSE Y2 : R.MES	42
TABLEAU 17 : COORDONNEES DU MAXIMUM.....	44
TABLEAU 18 : CARACTERISTIQUES DU MAXIMUM.....	44
TABLEAU 19 : VALEURS PARAMETRES AVEC RATIO 100/1.5/0.6 ET LE RATIO 100/5/1.....	45
TABLEAU 20 : VALEURS DES PARAMETRES AVEC RECIRCULATION 18% ET 25%	47
TABLEAU 21 : VALEURS DES PARAMETRES AVEC LES AJUSTEMENTS 100/1.5/0.6 – 18% ET 100/5/1 - 25%.....	48
TABLEAU 22: POURCENTAGE D'ABATTEMENT DES PARAMETRES APRES OPTIMISATION.....	49
TABLEAU 23: POURCENTAGE D'ABATTEMENT DES PARAMETRES APRES OPTIMISATION	49

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SCHEMA TECHNIQUE DE LA STEP	12
FIGURE 2 : LES ARMOIRES DE L'AUTOMATE	13
FIGURE 3 : L'ENTREE DU DEGRILLEUR.....	15
FIGURE 4 : TAMIS.....	16
FIGURE 5 : BASSIN D'HOMOGENEISATION	17
FIGURE 6 : BIOREACTEUR.....	19
FIGURE 7 : BASSIN DE CLARIFLOCCULATION	21
FIGURE 8 : RECIRCULATION DES BOUES PAR LA CONDUITE	23
FIGURE 9: SCHEMA D'ACTION D'UN POLYELECTROLYTE CATIONIQUE : PONTAGE ET ACTION COAGULANTE.....	27
FIGURE 10 : TAUX D'ABATTEMENT DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE AVANT OPTIMISATION.....	36
FIGURE 11: ETUDE DES RESIDUS DE LA REPONSE (NUAGE DE POINT) : Y1 : R.DCO.....	40
FIGURE 12 : ETUDE DES RESIDUS DE LA REPONSE (DROITE D'HENRY) : Y1 : R.DCO.....	40
FIGURE 13: ETUDE DES RESIDUS DE LA REPONSE (NUAGE DE POINT) : Y2: R.MES	43
FIGURE 14: ETUDE DES RESIDUS DE LA REPONSE (DROITE D'HENRY) : Y2: R.MES.....	43
FIGURE 15 : TAUX D'ABATTEMENT DES PARAMETRES PHYSIQUO-CHIMIQUE APRES OPTIMISATION	49

INTRODUCTION

Le Maroc se trouve face à d'importants problèmes environnementaux, en raison de l'évacuation d'effluents urbains et industriels non traités dans les cours d'eau et dans la mer. Le nombre de stations d'épuration des eaux usées qui fonctionnent dans le pays est très limité, bien que les quantités d'effluents soient en constante augmentation.

Les volumes annuels des rejets des eaux usées ont fortement augmenté au cours des trois dernières décennies. Ils sont passés de 48 millions à 600 millions de m³ entre 1960 et 2005 pour atteindre 700 millions en l'an 2010. Concernant la réutilisation des eaux usées épurées, seul 12% sont réutilisées actuellement. L'usage de ces eaux usées traitées touche le secteur agricole (couvrant en 2011 une superficie d'environ 550 hectares et atteindra 4000 hectares à l'horizon 2020), l'arrosage des golfs et des espaces verts, la recharge des nappes et le recyclage en industrie.

Tous les secteurs de l'industrie, toutes les activités commerciales laissent une empreinte sur l'environnement du fait qu'ils utilisent de l'énergie ou des matières premières, produisent des déchets ou des effluents que l'on retrouve ensuite dans le milieu naturel. De tels impacts peuvent survenir au niveau local, transfrontalier ou mondial et comporter des implications pour la santé.

Il existe des techniques pour épurer les eaux, s'appliquant tant au traitement des eaux usées qu'à la production d'eau potable. Ces dernières années, de nombreuses avancées en recherche et développement ont été nécessaires pour faire face à la complexité croissante de la pollution, quelle qu'en soit sa source. Les nouveaux engrais mis sur le marché, ainsi que la prise de conscience et l'identification de nouvelles sources de pollutions industrielles mais également pharmaceutiques, posent en effet de nouveaux défis technologiques à l'épuration.

Aujourd'hui, les entreprises industrielles doivent relever de nombreux défis dans le domaine de l'environnement : la protection des ressources, l'optimisation des consommations, la maîtrise des coûts, la sécurisation des outils de production, la traçabilité des déchets. En confiant aux spécialistes les défis liés au cycle de l'eau et à celui des déchets, elles peuvent se consacrer pleinement à leur métier et assurer le succès de leurs engagements.

Le présent travail est effectué dans la STEP de la CBGS, inaugurée en 2011 et qui accueille plus de 300 m³/j. cette station d'épuration à boues activées a été le sujet de mon travail qui a porté sur le suivi et le diagnostic des paramètres influents de la station, qui permettront par la suite l'amélioration et l'optimisation du rendement de la STEP, traduit en une très bonne qualité d'eaux traitées et réutilisées. En se basant sur des techniques et des outils récents pour mener à bien ce travail et avec l'aide des opérateurs s'occupant du maintien du bon fonctionnement de la station.

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. La pollution des eaux usées

1.1. Introduction

On appelle pollution de l'eau toute modification des caractéristiques de l'eau ayant un caractère gênant ou nuisible pour les usages humains, la faune ou la flore. Au cours de son utilisation, l'eau s'appauvrit ou s'enrichit de substances de toutes sortes, ou change de température. Les pollutions qui en résultent se retrouvent dans le milieu naturel (cours d'eau, mer).

Les 3 principales sources de pollution sont :

- ***les rejets urbains***

Résultant de la collecte et du traitement des eaux usées des ménages, des activités domestiques, artisanales et tertiaires ainsi que du ruissellement des eaux pluviales dans les zones urbaines,

- ***les rejets agricoles***

Résultant de la percolation des eaux de pluie dans les sols et de son ruissellement, de l'épandage de produits chimiques sur les sols, des activités maraîchères et des élevages,

- ***les rejets industriels***

Les effluents liquides d'un établissement industriel ne peuvent généralement pas être rejetés dans le milieu naturel sans avoir subi préalablement un prétraitement ou un traitement. Les valeurs limites de rejet sont déterminées en fonction de valeurs limites fixées au niveau national et des capacités d'acceptation du milieu récepteur, en l'occurrence le cours d'eau ou la station d'épuration collective. Leurs teneurs en matière organique et composés chimiques sont imposées dans le cadre de la procédure d'autorisation et de déclaration de certaines installations industrielles dites installations classées pour la protection de l'environnement. Cette réglementation est exclusive et les installations concernées ne sont pas soumises à la procédure de la loi sur l'eau mais doivent néanmoins respecter les principes édictés par cette loi.

1.2. Les principaux polluants des eaux

- **La pollution organique**

Un composé organique est caractéristique de toute matière vivante ou issue d'une matière qui a été vivante, et/ou contient du carbone. Un végétal, un excrément, mais aussi des hydrocarbures et des substances issues de la chimie (pesticides, solvants) sont des matières organiques. La plupart des matières organiques ne deviennent polluantes que lorsqu'elles sont en excès dans le milieu, notamment dans le milieu aquatique. On distingue, d'une part, les matières organiques biodégradables qui se décomposent dans le milieu naturel. C'est le cas des polluants d'origine humaine les plus classiques (excréments humains ou animaux, résidus des activités agricoles...) qui peuvent générer divers problèmes (odeurs, consommation d'oxygène) et surtout être associées à des micropolluants bactériens. D'autre part, les matières organiques non biodégradables (hydrocarbures..).

L'importance de l'oxygène dans l'eau est une variable déterminante pour la vie aquatique. On la mesure avec trois paramètres :

- La teneur en oxygène dissous.
- La demande chimique en oxygène (DCO) : elle représente la quantité d'oxygène qui serait nécessaire pour oxyder les substances organiques dissoutes ou en suspension. Lorsque des matières organiques sont présentes dans l'eau, leur oxydation entraîne une chute de la quantité d'oxygène dissous, ce qui peut nuire, en cas d'excès, à la survie de la faune et la flore.
- La Demande Biologique en Oxygène (DBO₅) : elle mesure le caractère biodégradable des matières organiques. Elle représente la quantité d'oxygène consommée par les microorganismes après 5 jours d'incubation pour oxyder les matières organiques biodégradables.

- **Les macro-polluants**

Les macro-polluants sont des molécules de grande taille (par rapport aux micropolluants), qui sont soit naturellement présents dans l'eau, soit apportés par l'activité humaine mais qui ne présentent pas d'inconvénient pour la vie aquatique, l'écosystème aquatique ou l'aptitude d'une eau destinée à la consommation humaine, tant qu'elles restent à des niveaux ou des concentrations limitées.

- **La pollution par les matières en suspension (MES)**

Elles sont minérales ou organiques, biodégradables ou non. Leur principal effet est de troubler l'eau : c'est la turbidité. La turbidité est un élément important de la qualité de l'eau, tant pour la vie aquatique (car elle réduit la transparence, empêche la pénétration de la lumière, ce qui a pour effet de freiner la photosynthèse, élément important de la croissance des plantes) que pour la production d'eau potable (car elle réduit l'efficacité des traitements de potabilisation de l'eau). Les MES conduisent aussi à des fermentations contribuant aux carences en oxygène, et ont des effets mécaniques sur les poissons par colmatage des branchies (chez les poissons).

- **La pollution toxique**

Certaines substances présentes dans les rejets industriels peuvent, même à dose infinitésimale, être dangereuses pour le milieu aquatique et pour l'homme (en cas de baignade ou d'ingestion). Les pollutions toxiques peuvent être classées en deux groupes suivant leur origine : les produits d'origine minérale, tels que les métaux ou métalloïdes (mercure, cadmium, plomb, arsenic...) ; les produits d'origine organique (produits de synthèse, dérivés nitrés...).

- **La pollution azotée et phosphorée**

L'azote et le phosphore sont ce qu'on appelle en agronomie deux facteurs limitant la capacité de développement des plantes terrestres et aquatiques. S'il y a beaucoup d'azote et peu de phosphore, le phosphore sera limitant, empêchera le développement des plantes. À l'inverse, s'il y a beaucoup de phosphore et peu d'azote, l'azote sera limitant. Quand il y a les deux, les plantes se développent. L'azote et le phosphore sont à la base des engrais agricoles.

Ils ne doivent cependant pas être excessifs dans l'eau. Dans l'eau de surface, ils peuvent provoquer une prolifération végétale (eutrophisation), qui va à son tour entraîner une demande d'oxygène, et donc un appauvrissement en oxygène dans l'eau et, à terme, une diminution, voire la disparition, de la faune piscicole.

L'**azote** (symbole chimique N) a la faculté de changer très facilement de forme chimique, en s'associant à des molécules d'oxygène ou d'hydrogène. L'azote et l'hydrogène forment l'ammoniaque NH_4^+ . L'azote, en consommant de l'oxygène, forme des nitrites (NO_2^-) ou des nitrates (NO_3^-).

Ces éléments contribuent à des situations d'anoxie des milieux aquatiques et peuvent favoriser une eutrophisation des écosystèmes.

L'agriculture et la chimie industrielle apportent les plus grosses contributions à ce type de pollution.

Le **phosphore**, (symbole chimique P) comme l'azote, entraîne une prolifération d'algues grandes consommatrices d'oxygène, ce qui peut conduire à asphyxier les milieux aquatiques (eutrophisation).

Le phosphore a pour principale origine l'agriculture et les rejets domestiques. Mais l'industrie en rejette également du fait de la présence de phosphore dans certains réactifs de laboratoire et dans les eaux de rinçage après utilisation d'une lessive.

- **Les micropolluants**

Le terme micropolluant désigne un composé minéral ou organique dont les effets sont toxiques à très faible concentration.

Ces micropolluants contaminent les cours d'eau soit par apport direct, par ruissellement, par érosion, soit indirectement par la pluie. On distingue aussi des apports ponctuels avec des sources clairement identifiées (rejets industriels, pollution accidentelle, rejets des eaux usées domestiques) et des sources diffuses, liées aux activités agricoles ou aux pluies (les pesticides, épandus sur de très larges surfaces, sont transportés dans l'atmosphère et retombent avec les pluies).

On distingue quatre types de micropolluants:

a) Les métaux : Les métaux sont naturellement présents dans les roches et les sols. La présence de gisements métallifères contribue à la contamination métallique des eaux. Néanmoins, l'essentiel provient des apports d'origine industrielle, qu'il s'agisse des exploitations minières ou des activités industrielles à travers le temps.

Les éléments métalliques surveillés sont le fer, le chrome, le zinc, le nickel, qui sont utiles au monde vivant en très faible quantité, et les métaux lourds, dont on ne connaît aucune utilité pour l'homme, et qui ont la propriété de s'accumuler dans la chaîne alimentaire : mercure, cadmium, plomb, arsenic, etc.

Les métaux lourds ont un fort caractère bio accumulatif et ont la particularité de ne pouvoir être éliminés. Ils changent simplement de forme. Au-delà d'un certain seuil, ils deviennent des toxiques importants pour l'homme.

- **Les pesticides** destinés à lutter contre les parasites des plantes. *L'agriculture est le principal utilisateur de pesticides*
- **Les « autres micropolluants organiques »**. Ce sont surtout des substances chimiques. On distingue principalement les hydrocarbures et les solvants.

b) Les hydrocarbures, peu biodégradables, s'accumulent et enrobent les plantes, les berges, stoppant leurs échanges vitaux et interdisant le développement de la faune et la flore. Lorsqu'ils forment un film de surface, ils s'opposent à l'oxygénation naturelle de l'eau. Les principaux hydrocarbures sont les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques).

c) Les solvants chlorés, utilisés dans le traitement des métaux, notamment les PCB, polychlorobiphényles, dérivés du benzène et du chlore, utilisés jusqu'en 1976 comme isolants dans les transformateurs électriques.

d) Les micros polluants issus de la micro biologie : bactéries, virus et parasites

1.3. Normes marocaines pour les rejets indirects

Le *tableau 1* décrit les limites imposées par la législation marocaine chargée de l'environnement pour les différents paramètres et concentrations des polluants dans les effluents industriels pour les rejets indirects.

Tableau 1 : Normes Marocaines pour les rejets indirects

Paramètres	Unité de mesure	Normes marocaine pour les rejets indirects
pH	/	6.5 – 8.5
Température	°C	< 35
DCO	mgO ₂ /l	< 1000
Matières en suspension	mg/l	< 500
DBO ₅	mgO ₂ /l	< 500
Azote total	mg/l	< 150
Phosphore total	mg/l	/
Sulfates	mg/l	400
Phénols	mg/l	5
Cyanures	mg/l	1
Mercure	mg/l	0.05
Chrome total	mg/l	1
Plomb	mg/l	0.5
Total métaux	mg/l	15

2. Les principaux types de traitement des eaux usées

Pour le traitement des effluents de l'industrie agro-alimentaires qui sont de caractère nocif par leurs polluants organiques, on distingue différents types de traitements adéquats permettant d'éliminer plus de 90% de la pollution organiques par voies biologique généralement. Quel que soit le type de

la station (filtres à sable, boues activées ou lagunage) le principe en est simple : les matières polluantes sont dégradées, grâce à un phénomène biologique naturel, par les bactéries et les micro-organismes contenus dans les eaux usées et entretenus en quantité suffisante dans les stations où ils transforment la pollution en boues que l'on sépare de l'eau par simple décantation.

2.1. Épuration par cultures libre

Le procédé dit « à **boues activées** » utilise l'épuration biologique dans le traitement des eaux usées. C'est un mode d'épuration par cultures libres. Dans une filière de traitement des eaux, le procédé à boues activées fait partie des traitements secondaires. Ce type de traitement est décrit en détail dans le (chap. 2)

2.2. Épuration par filtres à sable

Après avoir subi une décantation préalable pour éliminer la fraction décantable des matières en suspension, l'eau usée est envoyée sur un massif filtrant, scindé en au moins 3 unités, constitué de sable. Le temps de séjour de l'effluent est plus court dans un décanteur digesteur que dans la fosse septique. Le sable sert de support pour les micro-organismes. Leur développement dans le temps et la faible granulométrie du sable provoquent un colmatage du lit filtrant d'où l'intérêt d'avoir plusieurs unités afin d'obtenir des phases de repos. Le massif filtrant est drainé si la récupération de l'effluent est souhaitée pour une évacuation dans un exutoire superficiel.

2.3. Épuration par lagunages

La technique de lagunage consiste à faire circuler lentement l'effluent prétraité dans une succession de bassins peu profonds. Au cours de ce cheminement, l'épuration se fait de façon naturelle, grâce à la prolifération de micro-organismes et d'algues microscopiques, ces dernières produisant l'oxygène nécessaire par leur photosynthèse.

L'action des rayons UV du soleil, qui détruisent de nombreux germes microbiens pathogènes, permet de plus une décontamination bactérienne importante de l'effluent.

3. Biodégradabilité des rejets

Les effluents de l'industrie agro-alimentaire contiennent des constituants potentiellement biodégradables mais qui peuvent apparaître comme non directement biodégradables par la présence de toxiques ou inhibiteurs de croissance et/ou l'absence d'éléments de croissance. Ces effluents peuvent toutefois être traités par voie biologique sous réserve de prendre quelques précautions :

- détoxification préalable des effluents (notamment au travers de l'élimination ou la complexation de composés métalliques toxiques)
- apport d'éléments nutritifs tels que l'azote et le phosphore pour vérifier par exemple l'obtention d'un ratio C/N/P proche de 100/5/1.

Ainsi, pour les eaux agro-alimentaires, ce ratio C/N/P apparaît toujours non équilibré, les quantités d'azote et de phosphore disponibles sont généralement très faibles par rapport à la DBO₅.

Il est alors nécessaire d'apporter en continu ces éléments de croissance (azote et phosphore) indispensables à l'activité de la biomasse bactérienne épuratrice.

Outre la présence des nutriments, la biodégradabilité d'un rejet est évaluée le rapport DBO₅/DCO qui doit être généralement supérieur à 0.3 pour qu'une voie de traitement biologique soit adoptée.

CHAPITRE 2 : PARTIE EXPÉRIMENTALE

1. Présentation de l'installation de traitement

Le traitement des effluents de la CBGS s'effectue par une installation (*figure 1*) qui comprend essentiellement un ouvrage dans lequel sont maintenus des micro-organismes aérobies (qui ont besoin d'oxygène) qui dégradent la matière organique en la transformant en matière minérale. Le traitement se réalise dans un bassin d'aération dans lequel est maintenu en suspension un mélange eaux usées - bactéries aérobies, appelé "boues activées" ou "liqueur mixte". Les phénomènes mis en jeu sont donc les mêmes que ceux que l'on peut observer dans une rivière ou dans un lac, à la différence que les micro-organismes sont concentrés en très grand nombre dans un espace réduit (le bassin d'activation).

L'apport d'oxygène et le brassage du mélange "eaux usées - bactéries" sont assurés par des systèmes mécaniques : pont brosse, turbine ou insufflateur d'air. Les micro-organismes qui dégradent la pollution s'agglomèrent entre eux et forment un floc décantable, qui est ensuite séparé de l'eau dans un clarificateur. La pollution ainsi traitée est transformée en matière plus concentrée et décantable, les boues. Ces boues sont piégées dans les ouvrages au niveau des clarificateurs. Riches en matière organique, les boues doivent être stabilisées, c'est-à-dire transformées, au moins partiellement, en matière minérale.

L'ensemble des éléments de cet ouvrage sont contrôlés de manière automatique à l'aide d'un automate (*figure 2*), c'est-à-dire sans l'intervention d'opérateur. Ce comportement peut être figé, le système fera toujours la même chose, ou bien peut s'adapter aux conditions et aux paramètres instantanés de la station.

Figure 1 : Schéma technique de la STEP

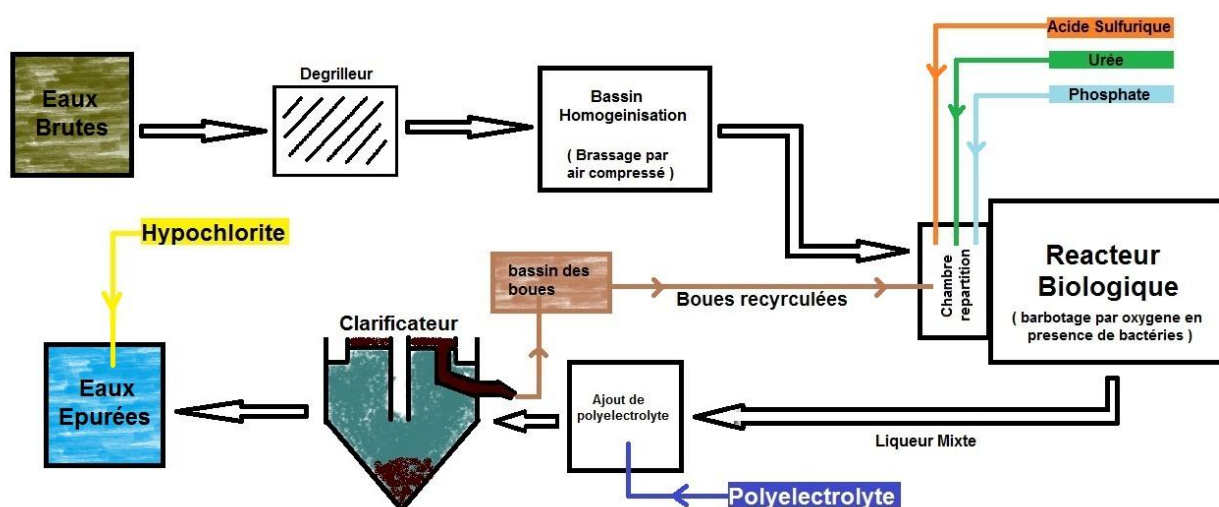


Figure 2 : Les armoires de l'automate



Choix du type de traitement :

- **Bases du choix de traitement biologique à boues activées :**

Les traitements des eaux résiduaires dans les STEP varient en fonction de la nature des eaux usées à traiter et de la sensibilité du milieu récepteur à la pollution.

Le type de traitement pour les eaux résiduaires de la CBGS a été choisi après la réalisation d'une étude de biodégradabilité, sur un échantillon des rejets de l'usine, à l'aide du test de respirométrie.

- **Avantages et inconvénient d'un traitement par boues activées :**

Le procédé de traitement présente les avantages suivants:

- Bonnes performances épuratoires par rapport aux traitements physico-chimiques ;
- Bon rendement d'épuration (surtout en ce qui concerne la DBO₅ et la DCO) ;
- Superficie réduite, ce qui favorise l'intégration dans le site de la société ;
- Procédé adapté aux charges organiques importantes.

Par ailleurs le procédé a aussi ses inconvénients :

- Investissements souvent importants dans la mesure où la station devra être dimensionnée pour recevoir la pollution maximale qui n'est atteinte que quelques fois par année ;

- Coût énergétique élevé ;
- Nécessité d'une exploitation attentive (extraction régulière des boues, adaptation de l'aération aux besoins, etc.) réalisée par un personnel ayant suivi une formation adéquate ;
- Inadaptation aux variations brutales et importantes des flux de pollution.

1.1. Les éléments de l'ouvrage

La STEP est constituée :

- d'une chaîne de traitement composée d'un dégrilleur grossier, d'un tamis fin, d'un bassin d'homogénéisation, d'un bassin de répartition, de deux bioréacteurs, d'un bassin de floculation, d'un flottateur (clarificateur), d'un bassin de désinfection, d'un bassin des boues, d'une boucle de recyclage des boues, d'une centrifugeuse et d'un compresseur.
- d'un local technique contenant une armoire électrique permettant d'automatiser, de commander et de contrôler les actionnements électriques de l'installation,
- D'un laboratoire d'analyse.

Le suivi de la station s'effectue à quatre niveaux différents :

- ✓ les mesures en ligne (débits, concentration en oxygène dissous) et les mesures hors ligne réalisées quotidiennement au laboratoire (pH, température, DCO, MES, V_{30}) ou de manière hebdomadaire (DBO5) sur des échantillons pris des réacteurs biologiques, de l'entrée et de la sortie de station;
- ✓ le contrôle du système d'aération, des pompes chargées du recyclage, de déshydratation,...
- ✓ l'outil de supervision apportant affichage des mesures en lignes, alarmes concernant certains dysfonctionnements des matériels, historique des données, ...
- ✓ la gestion globale de l'installation par l'opérateur, informé par l'outil de supervision.

L'opérateur doit donc faire appel à sa propre expérience : observer visuellement les différents bassins, interpréter les mesures pour évaluer l'état du procédé, conduire la station (cycle d'extraction, de recyclage et de déshydratation des boues, ajout de nutriment, ajustement des

boucles de contrôle du raclage et de purge du flottateur), détecter et localiser l'ensemble des défauts et enfin prendre les actions correctives nécessaires.

Le dégrillage

L'étape de prétraitement est une étape cruciale pour un bon fonctionnement du procédé car elle consiste à séparer les éléments solides ou particuliers les plus faciles à retirer des eaux usées et susceptibles de gêner les traitements ultérieurs ou d'endommager les équipements. Il s'agit des déchets volumineux.

Au cours du prétraitement, les eaux industrielles de la CBGS passent par deux étapes : dégrillage et tamisage. Le prétraitement ne comporte ni opération de dessablage (car l'activité de la société ne génère pas des sables et le chemin parcouru par l'eau, de la société à la station de traitement, est court) ni opération de déshuilage (car l'utilisation des graisses est négligeable).

Figure 3 : L'entrée du dégrilleur



- **Le dégrillage** (figure 3) consiste à faire passer les eaux usées au travers d'une grille dont les barreaux, plus ou moins espacés, retiennent les éléments les plus grossiers. Le but de l'opération de dégrillage est d'éviter :
 - Le colmatage des pompes de relevage.
 - L'accumulation de déchets non biodégradables (plastiques...) sur les ouvrages.
 - Le colmatage des canalisations de transfert.

- **Le tamisage** (*figure 4*) fin consiste à retenir mécaniquement tous les petits corps étrangers (plastique...) de dimension > 1 mm, pouvant perturber le fonctionnement des installations.

Après avoir traversé le tamis fin, l'eau ainsi finement tamisée est dirigée vers le bassin d'homogénéisation pour subir un traitement primaire. Alors, que les déchets récupérés (Refus du tamis fin) sont stockés dans une benne jusqu'à remplissage pour être destinés à la décharge contrôlée.

Figure 4 : Tamis



Le tamis fin fonctionne en continu et il est équipé d'un système de nettoyage automatique avec l'eau de service.

Le bassin d'homogénéisation (bassin tampon) :

Cette étape consiste à aérer l'effluent brut par diffusion d'air au fond du bassin à l'aide d'un supprimeur. Le but de cette étape de traitement primaire est d'homogénéiser l'ensemble des eaux. L'eau tamisée entrant au bassin d'homogénéisation (*figure 5*) (bassin construit en béton armé et qui a une capacité totale de 800 m^3) est aérée. Cette aération est assurée par un des deux surpresseurs d'homogénéisation (un en marche et l'autre en secours).

L'air fourni par le supprimeur est injecté dans le fond du bassin d'homogénéisation où il est distribué par 157 diffuseurs d'air.

Figure 5 : Bassin d'homogénéisation



Le bassin d'homogénéisation est muni d'un capteur à ultrason qui indique le niveau ou le pourcentage du bassin rempli. La reprise des effluents du bassin d'homogénéisation est assurée par un ensemble de trois pompes immergées dans le bassin. Ces pompes assurent aussi le transfert de l'effluent à traiter vers le bassin de répartition.

Le choix des supprimeurs au lieu d'un autre moyen d'aération (exemple d'aérateurs de surface) permet :

- Un meilleur rendement de dissolution de l'oxygène,
- D'éviter les aérosols dus aux aérateurs de surface.

La Chambre de répartition :

Cette chambre est l'ouvrage où se fait le mélange de l'eau arrivée depuis le bassin d'homogénéisation et des trois principaux additifs qui sont l'acide sulfurique, l'urée et phosphate d'ammonium. Ce même ouvrage reçoit aussi les boues recirculées toutes les 1h ou 1h30min selon le débit de la station. Le passage de ces éléments au bioréacteur (bassin d'aération) par cette chambre est primordial.

La mesure de pH dans le bassin de répartition est réalisée par une sonde de pH.

Le pH de l'effluent brut est alors ajusté automatiquement entre 7 et 8 par l'ajout d'acide sulfurique (H_2SO_4) assuré par une des deux pompes doseuses de débit maximal de 21 l/h.

L'apport en azote est assuré par l'ajout d'urée. Celle-ci est stockée dans un bac de préparation agité de 500 litres et l'injection se fait à l'aide d'une des deux pompes doseuses de 14.7 l/h.

L'apport en phosphore est assuré par l'ajout de phosphate d'ammonium. Celui-ci est aussi stocké dans un bac de préparation agité de 500 litres et l'injection se fait à l'aide d'une des deux pompes doseuses de débit maximal de 14.7 l/h.

Le bassin de répartition est muni d'un agitateur qui a le rôle d'homogénéiser le mélange : eau homogénéisée-acide sulfurique-urée-phosphate d'ammonium.

Afin de maintenir une biomasse suffisante dans les réacteurs biologiques, le fonctionnement du procédé repose sur le recyclage par pompage, dans le bassin de répartition, d'une partie des boues stockées dans le bassin des boues.

Le bassin d'aération :

L'aération des eaux résiduaires a lieu dans deux bassins d'une capacité de 400 m³ chacun contenant les boues activées, qui ont une forme appropriée en fonction du système d'aération, du mode d'introduction des eaux et de la boue activée. On appelle ces bassins : bassins d'aération (*figure 6*), bassins à boues activées ou encore bassins d'oxydation. L'aération peut être assurée en surface par des turbines, ou dans notre cas par le fond par des procédés de rampe de distribution de bulles d'air alimentées par un surpresseur ou par un compresseur d'air. Les rampes de distribution sont complétées par des diffuseurs d'air dites grosses bulles ou fines bulles, suivant l'efficacité recherchée. Le rendement de transfert d'air dans l'eau peut être amélioré par l'augmentation de la hauteur d'eau (uniquement pour les rampes de distribution). Chaque réacteur biologique comporte un oxymètre qui affiche le taux d'oxygène.

Les besoins journaliers en oxygène sont en rapport avec la charge organique journalière et son mode de dégradation, ainsi que la quantité d'azote à nitrifier. Bien que la dégradation de la pollution carbonée s'arrête lors du cycle de Krebs, il faut réoxyder les molécules transporteuses d'hydrogènes de ce cycle via la respiration (cette voie capte son électron en réoxydant ces molécules). Or la respiration nécessite un accepteur d'électrons, soit un substrat respirable oxydé tel que l'oxygène. Finalement, l'oxygène apporté est utilisé dans la voie de la respiration pour produire de l'énergie, voie qui va réalimenter le cycle de Krebs, permettant

ainsi une dégradation continue de la MO. Lors de la dénitrification, c'est l'oxygène des nitrates qui est utilisé. Ainsi, les besoins en oxygène sont calculés à partir des besoins des chaînes respiratoires bactériennes et des besoins pour la nitrification. La quantité à apporter en oxygène correspond alors à ces besoins moins l'économie faite lors de la respiration des nitrates. Les besoins en oxygène diffèrent donc de la quantité à apporter.

Figure 6 : Bioréacteur



En simplifiant, on peut décrire ce processus par l'équation :

Eau résiduaire + biomasse épuratrice + O₂ → eau purifiée + accroissement de biomasse + gaz résiduels (CO₂...).

Les micro-organismes présentes dans les réacteurs biologiques se nourrissent de matières polluantes et ont besoin de l'oxygène. Mais cet équilibre biologique est fragile :

- par manque d'aération ou en présence de produits toxiques, ils meurent ;
- par variations brutales des quantités de matières à traiter (excès de pollution ou d'eau) ils assument mal leur rôle. Dans ce cas, l'installation fonctionne mal et les risques de pollution du milieu récepteur apparaissent.

Floculation :

Le principe de floculation utilisé repose sur l'utilisation du polyélectrolyte qui a pour effet une floculation extrêmement marquée par formation de ponts entre particules grâce aux longues chaînes ramifiées ainsi qu'une très forte diminution de la résistance de la boue

permettant un drainage plus rapide de l'eau. Ces flocculant sont des macromolécules à longue chaîne.

Les boues en excès récupérées des bioréacteurs sont dirigées vers un traitement par flottation. Au préalable, ces boues sont flocculées dans un bac agité, avant envoi en flottation.

La floculation des boues activées est un processus dynamique dépendant de facteurs physiques, chimiques et biologiques. Les floes de boue résultent d'interactions complexes entre les diverses entités les constituant.

L'effluent sortant des réacteurs biologiques est envoyé, à l'aide d'une conduite inoxydable, vers un bassin de floculation muni d'un agitateur. Ce dernier assure le mélange de l'effluent avec le flocculant injecté par une pompe doseuse de débit maximal de 65.6 l/h. Les boues sont alors agglomérées dans un floe.

Le polymère utilisé pour la floculation des boues activées est le DKFLOC K-436 qui fait partie d'une série de DKFLOK conçu tout spécialement pour répondre aux plus grandes exigences dans le domaine de traitement des eaux résiduaires industrielles.

La préparation du polyélectrolyte est confiée à une unité de préparation automatique diluant un polymère en poudre à l'aide de polymères POLYPACK APS-MAX-400.

Unité de préparation automatique du polymère :

La POLYPACK APS-MAX-400 est constitué d'un réservoir à deux compartiments (un compartiment de préparation et un compartiment de maturation) communiquant grâce à des collecteurs qui assurent un temps de rétention optimum dans chaque compartiment pour obtenir une préparation homogène.

Le contrôle automatique se fait par un détecteur de niveau (par le biais d'une armoire électrique).

La production de polymère débute lorsque les pompes sont en marche et que le niveau «bas» est atteint : le détecteur du niveau «bas» actionne la vanne d'arrivée d'eau et lance le dosage de la poudre (à l'aide d'un doseur de poudre).

La production de polymère s'arrête lorsque la solution atteint le niveau «haut» : le détecteur de niveau «haut» arrête le dosage de la poudre et ferme la vanne d'arrivée d'eau.

L'agitation dans les deux compartiments est assurée par deux agitateurs et elle est maintenue pendant tout le cycle d'opération.

La dissolution du polymère dépend du débit d'eau, de l'agitation dans le compartiment de préparation, du type et de la concentration du polymère.

Le DKFLOC K-436 est caractérisé par un ensemble d'avantages dont on peut citer :

- ✓ Production des floccs qui sédimentent facilement ;
- ✓ Efficacité dans un vaste éventail de pH ;
- ✓ Très peu d'influence sur le pH final du traitement ;
- ✓ Grande efficacité à basse température.

Le clarificateur :

En sortie de réacteur, nous obtenons une liqueur mixte composée de boues flocculées et d'eau épurée prête à être rejetée en milieu naturel. Elles sont séparées au sein du clarificateur (*figure 7*) qui a une fonction de séparation de phase et une fonction d'épaississement afin de ramener la boue la plus concentrée possible dans le réacteur biologique.

La séparation liquide-solide, qui est la base du procédé de traitement des eaux usées, produit une eau épurée, rejetée dans le milieu naturel, et un concentrât désigné sous le terme de "boues" ou "boues résiduelles".

Figure 7 : Bassin de clarifloculation



Pour la clarification de la liqueur mixte, il a été installé un flottateur permettant d'obtenir la meilleure clarification de l'effluent épuré et le meilleur épaissement des boues biologiques.

Le système se compose de deux parties :

- Flottateur.
- Ballon de pressurisation (système de pressurisation de l'eau).

La flottation à l'air dissous consiste à accrocher de très fines bulles d'air au floc et à constituer des agrégats très légers.

La production de ces fines bulles d'air est obtenue en recyclant une fraction de l'eau clarifiée par flottation sous une pression de 4 à 6 bar, en y dissolvant à saturation de l'air comprimé (ballon dit de pressurisation), puis en détendant cette eau, au contact de l'eau brute floculée et à la contre-pression du flottateur. Cette détente doit être effectuée sous plusieurs précautions ainsi que le mélange avec l'eau floculée.

Le flottateur est un ouvrage cylindrique, équipé d'un dispositif de raclage des boues superficielles et des boues de fond.

L'eau floculée entre à la partie centrale inférieure et sort sous une paroi siphonide périphérique. Une fraction de l'eau flottée est reprise vers un système de pressurisation.

Le but est de clarifier l'eau à l'aide d'un flottateur qui a la double fonction de :

1. clarifier l'eau en traitement,
2. concentrer les boues activées pour en permettre le recyclage continu en amont des réacteurs biologiques.

L'effluent chargé de floccs est introduit verticalement, à la base de la chambre centrale de mélange où il est mis en contact avec les micros-bulles d'air apporté par l'eau pressurisée. Les macro-flocs fixés aux microbulles sont entraînés à la surface du flottateur, où le racleur à fonctionnement temporisé (fonctionnement pendant 10 minutes et arrêt pendant 30 minutes), les récupère et les envoie vers une trémie de collecte des boues flottées.

L'eau clarifiée est entraînée vers une trémie de collecte. De ce niveau, l'eau épurée est renvoyée vers le circuit de pressurisation et le surplus vers le bassin de désinfection.

Les floccs qui ne sont pas entraînés à la surface et qui se déposent dans le fond du flottateur sont d'abord racleés, à l'aide du racleur de fond, puis entraînés vers une trémie de fond. Via une purge automatique à fonctionnement temporisé (ouverture pendant 15 secondes et fermeture pendant 10 minutes), ces boues décantées sont extraites et puis envoyées vers le bassin des boues.

Le poste de recirculation :

Ouvrage permettant le soutirage des boues du clarificateur vers la chambre de répartition pour maintenir une charge de boues constante dans le bassin d'aération.

Figure 8 : Recirculation des boues par la conduite



Le silo à boues :

Ouvrage permettant le stockage des boues avant épandage de boues liquides ou avant un traitement par déshydratation.

1.2. Origines des l'effluents à traiter au sein de la CBGS

Les effluents de l'industrie des boissons gazeuse CBGS ont souvent une demande

Biochimique élevée de l'oxygène (DBO), donc le traitement par voie biologique est le plus adéquat et plus précisément celui par boues activées. Les principales sources d'alimentation de la station en eaux usées sont :

- Lavage et rinçage des bouteilles
- Lavage/rinçage de l'unité d'adoucissement

- Lavage/rinçage de l'unité de soutirage
- Lavage/rinçage de l'unité filtration du sirop simple
- Lavage/rinçage de l'unité de filtration de l'eau
- Lavage des cuves de stockage de sirop fini

2. Échantillonnage

L'échantillonnage se fait de façon journalière pour la DCO, DBO₅ et les MES, d'une façon hebdomadaire pour l'azote total (Nt) et le phosphate total (Pt) et mensuellement pour les autres paramètres à savoir les métaux lourds. Les prélèvements sont fait dans trois points d'échantillonnage : a l'entrée de la STEP, au niveau du réacteur biologique et a la sortie de la STEP pour un bon suivi de l'évolution du traitement et pour le calcul du rendement. Les échantillons étaient pris en quantités suffisantes de 300ml pour la réalisation des différents tests. Les réactifs utilisés sont préalablement préparés du type LCK de la société HACH LANGE.

3. Analyse des échantillons

3.1. Les mesures des paramètres physico-chimiques de la STEP

Pour apprécier la qualité des eaux en général, différents paramètres sont utilisés que

Nous classerons ainsi :

- les paramètres physico-chimiques :
 - Gaz dissous (oxygène)
 - Température
 - pH,
 - Conductivité
 - Potentiel redox
- les paramètres de la pollution particulaire
 - Matières grossières
 - Matières en suspension (MES)
 - Matières volatiles (MV)
 - Turbidité
- les paramètres de la pollution organique globale
 - DBO,
 - DCO,
 - COT

(Spectro UV)

- les paramètres de la pollution dissoute
 - Composés azotés (NTK, NO_3 -...)
 - Composés phosphorés (PT...)
 - Autres constituants minéraux
 - Composés organiques (détergents, Hydrocarbures, phénols, O_x)
- les paramètres microbiologiques
 - Coliformes totaux
 - Coliformes fécaux
- les paramètres écotoxicologiques
 - CL50
 - Tests (toxicité aiguë, globale...)

En fait, les mesures ne sont pertinentes que pour des types d'eaux bien spécifiques. Ainsi, en épuration biologique par exemple, le suivi de certaines mesures (O_2 , DBO, redox, azote) permet d'optimiser le traitement (aération, recirculation...) et de piloter l'installation en cas de dysfonctionnement.

Sur le plan réglementaire, les paramètres imposés pour le contrôle du rejet

Dépendent du type d'eaux (eaux urbaines, eaux industrielles) et de la nature des activités.

Le pH

Le pH varie entre 9 et 11 selon la teneur des effluents en éléments basiques en grande partie, sa valeur est notée in situ depuis un pH mètre en contact direct avec les eaux dans le réacteur biologique.

Le débit

Le débit mesuré à l'aide d'un débitmètre à moulinet. Le principe repose sur la mesure de la vitesse de l'eau dans une section rectangulaire. Les valeurs sont fournies par un débitmètre à l'entrée.

La demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO représente la quantité d'oxygène consommée par une substance chimique oxydante, dans des conditions normalisées. Ce paramètre est facile et rapide à obtenir, même si certains composés peuvent ne pas être oxydés ou perturber la mesure.

On utilise une solution préparée LCK514 du dichromate et les échantillons prélevés en 3 points de la station : entrée, réacteur biologique et sortie. Le mélange est chauffé au thermostat

100°C LT200 pendant 120min avant de lire la valeur à l'aide d'un spectrophotomètre DR2800

La demande biochimique en oxygène à 5 jours (DBO₅)

La DBO₅ est la quantité d'oxygène dissous consommée en 5 jours par les micro-organismes présents dans le milieu pour réaliser une autoépuration, simulés par des bactéries.

La méthode du travail consiste à prélever des échantillons de 25 ml de l'entrée de la STEP (forte concentration) et 250ml de la sortie (faible concentration) et des les mètres dans un flacon avec un barreau aimanté et des grains de soude, avant de fermer hermétiquement les bouteilles. A cause de la charge élevée de l'échantillon de l'entrée on le dilue 4 fois avant de procéder à l'incubation. Les résultats sont notés directement depuis l'afficheur LED sur le couvercle du flacon.

Le rapport DCO/DBO₅

Il donne une indication sur le caractère biodégradable des effluents. Si le rapport DCO/DBO₅ < 2 - l'effluent est facilement biodégradable; $2 < \text{DCO/DBO}_5 < 3$ - l'effluent est biodégradable avec des souches sélectionnées; $\text{DCO/DBO}_5 > 3$ - l'effluent n'est pas biodégradable. Les mesures sont réalisées selon des méthodes normatives, après décantation des matières en suspension.

Matières en suspension (MES)

La méthode adoptée est celle de la filtration sur filtre GF/C de 1,2 µm de porosité. Les filtres sont séchés dans l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant et refroidis dans un dessiccateur. La teneur en MES est obtenue par différence des poids des filtres avant (après humidification et passage à l'étuve) et après filtration et séchage. Matériel utilisé : pompe sous-vide, filtre de 1,2 µm de porosité et une étuve. Pour effectuer nos analyses on a besoin de 25ml d'eau à l'entrée de la STEP (forte concentration), de 25ml du réacteur biologique (forte concentration) et de 50ml à la sortie de la STEP (faible concentration).

L'azote total Kjeldahl (NTK)

Est dosé avec la solution préparée LCK238 du Phosphormolybdenum Blue (d'après les standards ISO 6878-1-1986, DIN 38405 D11-4). La valeur est directement lue sur le Spectrophotomètre DR 2800 après 1h au thermostat Hach Lange LT200 à 100°C.

Remarque : Une partie de l'azote incluant notamment l'azote organique particulaire est éliminée par assimilation de la matière carbonée par des bactéries hétérotrophes aérobies en présence d'oxygène dissous.

***Le phosphore total (Pt)***

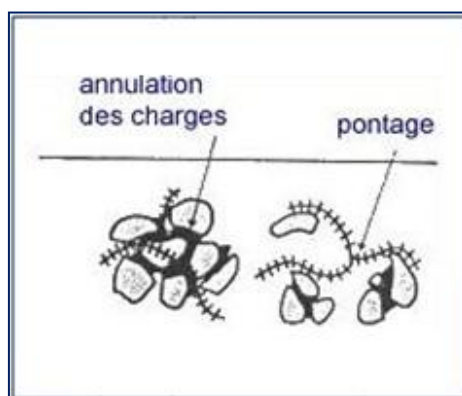
Est dosé avec la solution préparée LCK349 du Peroxodisulphate, et la détection photométrique avec le 2,6-Diméthylphénol, après 1h dans le thermostat on note la valeur sur le spectrophotomètre.

Autres tests pour les métaux lourds qui se font rarement par du personnel externe, pour la raison qu'ils sont en concentration très faible et négligeables, n'atteignant pas le seuil de toxicité réglementé.

3.2. Le polyélectrolyte

Un polyélectrolyte est un polymère ionique comportant un grand nombre de sites ioniques et ayant une continuité des régions d'interactions ioniques. Une fois dissous dans un solvant polaire comme l'eau, le polymère se dissocie, et apparaissent des charges sur son squelette et des contre-ions en solution. La charge est dépendante des groupements chimiques présents et parfois du pH de la solution.

Figure 9: Schéma d'action d'un polyélectrolyte cationique : pontage et action coagulante



Parmi les différents polyélectrolytes qui sont à disposition, il faudra choisir le polymère le plus économique, assurant un floc bien différencié, résistant mécaniquement.

C'est un composé synthétique qui joue le rôle de coagulant en neutralisant les charges négatives des colloïdes et des matières en suspension, pour faciliter leur agglomération et aussi il a le rôle du floculant qui assemble les petites flocs dispersées en flocs assez grandes et facilement séparables de la phase liquide (eau épurée).

La préparation de dissolutions de polyélectrolyte et son postérieur dosage impliquent de traiter avec des produits à haute viscosité. L'emploi de doseurs à basse et très basse fréquence, à haute capacité d'aspiration, équipés de valves adéquates permettent un traitement volumétrique de ces fluides dans un important rang de débits.

Le polymère utilisé pour la floculation des boues activées est le DKFLOC K-436 qui fait partie d'une série de DKFLOK conçu tout spécialement pour répondre aux plus grandes exigences dans le domaine de traitement des eaux résiduaires industrielles.

4. Méthodologie des plans d'expérience

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse.

Objectifs

L'essentiel de la méthodologie de la recherche expérimentale consiste à maîtriser, décrire, prévoir ou expliquer le phénomène étudié, c'est-à-dire trouver les relations existantes entre les facteurs et les réponses. Ceci est souvent obtenu en modélisant le phénomène (par exemple un modèle mathématique). Ces modèles mathématiques peuvent être infiniment variés et dépendent du phénomène étudié : modèle linéaire ou non, équation différentielle, etc.

L'expérimentation a donc pour objet de déterminer la forme de ces relations et les valeurs des coefficients du modèle choisi. La démarche est donc la suivante :

Formuler clairement sans problème.

- Etablir une stratégie expérimentale ou plan d'expérimentation, en choisissant les expériences en fonction des objectifs.
- Déterminer la relation entre la ou les réponses et les facteurs (les coefficients du modèle mathématique).

Les objectifs peuvent être atteints par étapes successives (démarche séquentielle), chacune donnant lieu à une série homogène d'expériences qui forment une matrice d'expérience. Un plan d'expérimentation pouvant donc être constitué d'une suite de matrices d'expériences. Une première ébauche permettra de mieux choisir les nouvelles orientations à prendre pour préciser les seuls points intéressants de l'étude et les directions de recherche à abandonner pour éviter la perte du temps.

4.1. Stratégie dans le choix des méthodes d'expérimentation

Cette stratégie doit faciliter l'organisation progressive de l'acquisition des connaissances. Elle doit également minimiser le plus possible le nombre d'expériences mais elle ne doit pas sacrifier la qualité des résultats. Au contraire, on cherche la meilleure précision possible des résultats.

➤ Terminologies

- **Facteur** : C'est tout ce qui a, ou est supposé avoir, une influence sur le phénomène étudié. Les facteurs sont considérés comme cause possible des réponses. Un facteur peut être qualitatif ou quantitatif, continu ou discontinu, contrôlable ou non contrôlable.
- **Domaine de variation des facteurs** : C'est l'espace dans lequel peuvent varier les facteurs. Ces domaines doivent vérifier certaines conditions : disponibilité des produits, limite du matériel, efficacité et continuité des réponses dans ces domaines.
- **Niveau** : Valeurs prises par les facteurs au sein du domaine expérimental.

Variables naturelles et variables codées : Les variables naturelles sont définies algébriquement pour quantifier les divers facteurs. Généralement, elles ne sont pas exprimées dans le même système d'unités, ce qui rend difficile la comparaison de leurs effets. Pour cela, une transformation des variables naturelles (U_{ij}) en variables codées sans dimension X_{ij} est alors nécessaire. Le passage de la variable naturelle à une variable codée se fait à partir de la formule suivante :

$$X_{ij} = \frac{U_{ij} - U_0}{pas}$$

Où U_0 est la valeur au centre en unité courante, et « pas » est le pas de variation de la variable en unité courante.

- **Réponse** : Notée Y , est le résultat expérimental d'une expérience. Elle doit être reproductible et continue dans le domaine expérimental défini. La réponse théorique, notée « y » est la vraie valeur de la réponse que l'on obtiendrait s'il n'y avait pas d'erreurs expérimentales ($\delta = 0$)

- **Matrice d'expérience** : les expériences nécessaires à la détermination des coefficients du modèle mathématique, sont choisies dans le domaine expérimental et constituent une matrice d'expériences. C'est un tableau de N lignes correspondant aux N expériences et de k colonnes correspondant aux k variables (facteurs) étudiées. L'élément X_{ij} de la matrice ainsi formée, correspond aux niveaux que prend la j ème variable codée à l' i ème expérience.

- Un plan d'expérimentation est la traduction d'une matrice d'expériences en variables naturelles.

4.2. Méthode de surface de réponse

Les premiers plans d'expériences diffusés dans la littérature ont été destinés à l'estimation des effets des facteurs. Cependant, du point de vue industriel, tous les problèmes rencontrés ne consistent pas uniquement à estimer puis à comparer les effets des facteurs. De nombreuses études consistent à trouver, s'il existe, un optimum dans un domaine d'étude appelé domaine expérimental. Pour ce faire, on utilise la méthodologie des plans d'expériences pour surfaces de réponse, traitée dans ce chapitre.

Si l'étude de criblage permet, à travers l'obtention d'un modèle additif, d'identifier les éléments ayant une influence significative sur une réponse parmi une liste de facteurs. Une étude de surface de réponse quant à elle permet, à travers un modèle polynômiale le plus souvent, de traduire les variations d'une réponse dans un domaine expérimental.

Les étapes à suivre dans le cas d'une étude de surface de réponse sont les mêmes que celles réalisées lors d'une étude de criblage. Cependant, leur contenu est différent. En effet, le modèle à établir lors d'une étude de surface de réponse n'a pas la même forme que celui recherché dans une étude de criblage. Or, le contenu des étapes à suivre lorsqu'on mène une étude par plan d'expériences est étroitement lié à la forme du modèle recherché.

Les étapes d'une étude par plan d'expériences sont rappelées ici :

- Définition des objectifs et des réponses,
- Choix d'une stratégie expérimentale,
- Définition des facteurs,
- Définition du domaine expérimental,
- Définition du modèle empirique,
- Construction du plan d'expériences,
- Expérimentation,
- Analyse globale des résultats d'essais,
- Analyse mathématique des résultats d'essais,
- Analyse statistique du modèle,
- Analyse graphique du modèle,
- Validation du modèle et des informations obtenues.

4.3. Les types de matrices de surface de réponses

- Les plans composites centrés proposés par G.E.P. Box et K.B. Wilson en 1951
- Les plans proposés par G.E.P. Box et D.W. Behnken en 1960
- Les réseaux uniformes proposés par D.H. Doehlert en 1970

Il est possible de calculer le nombre de traitements expérimentaux N de manière générale pour les plans composites centrés et les réseaux de Doehlert. En revanche pour les plans proposés par Box et Behnken, le nombre N de traitement ne peut être calculé de manière générale.

Pour les plans composites centrés on obtient pour k facteurs :

$$N = 2^k + 2k + 1$$

Et pour les réseaux de Doehlert on a pour k facteurs :

$$N = k^2 + k + 1$$

Bien qu'il y ait eu d'autres développements méthodologiques, proposant parfois des matrices d'expériences d'excellente qualité, ce sont ces trois dispositifs expérimentaux que l'on cite le plus régulièrement et que l'on rencontre le plus fréquemment dans les logiciels.

4.4. Plans composites centrés

Le plan d'expériences utilisé pour notre cas est le plan Composite qui est un plan dont un polynôme de 2ème degré (contenant un effet moyen général, des effets linéaires, des effets d'interactions mais aussi des effets quadratiques) permettant de donner une bonne

modélisation du phénomène étudié, un tel plan est dit plan pour surface de réponse. Ce choix a été motivé par le fait que notre but est surtout d'optimiser les paramètres de la marche des bas produits, ce qui impose l'utilisation d'un plan de surface de réponse qui est fortement dépendant d'un choix du modèle polynomial, en l'occurrence un modèle de deuxième degré incluant aussi les effets dits quadratiques. Ce modèle est donc donné explicitement par :

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_{1-1} * (X_1 * X_1) + b_{2-2} * (X_2 * X_2) + b_{1-2} * (X_1 * X_2)$$

b₀ : effet moyen

b₁ : effet du polyélectrolyte

b₂ : effet du pH

b₁₋₁ : effet quadratique du polyélectrolyte

b₂₋₂ : effet quadratique du PH

b₁₋₂ : interaction entre le polyélectrolyte et le pH

Tableau 2 : Caractéristiques du problème

Objectif de l'étude	Etude dans un domaine expérimental: Surface de Réponses
Nombre de variables	2
Nombre d'expériences	11
Nombre de coefficients	6
Nombre de réponses	2

Tableau 3 : Domaine expérimental

	<i>Facteur</i>	<i>Unité</i>	<i>Centre</i>	<i>Pas de variation</i>
<i>U1</i>	<i>[poly]</i>	<i>g/l</i>	<i>3.6</i>	<i>0.2</i>
<i>U2</i>	<i>pH</i>		<i>7.0</i>	<i>1.0</i>

[Poly]: concentration du polyélectrolyte.

Tableau 4 : Réponse(s) expérimentale(s)

	<i>Réponse</i>	<i>Unité</i>
<i>Y1</i>	<i>R.DCO</i>	<i>%</i>
<i>Y2</i>	<i>R.MES</i>	<i>%</i>

R.DCO : Rendement de DCO en %

R.MES : Rendement de MES en %

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

Objectif de l'étude

- Réaliser un diagnostique de la STEP et un suivi des paramètres physico-chimique pour détecter les points des anomalies.
- Utiliser l'outil Nemrod pour les expérimentations
- Proposer et apporter des améliorations a son fonctionnement.

1. Diagnostique de la STEP

Tableau 5 : Les paramètres techniques de la STEP

Paramètres	Valeurs
Débit Q	$10 \text{ m}^3/\text{h}$
Charge volumique C_v	$1.7 \text{ Kg de DCO}/\text{j}/\text{m}^3$
Rapport DCO/DBO_5	2.3
Temps de séjours hydraulique T_s	30h
Taux d'oxygène dissout dans le réacteur	2 mg/l
Indice des boues IB	42 ml/g
Ratio C/N/P	100/1.5/0.6
Taux de recirculation des boues	18%

Dans ce (tableau 5) on peut voir clairement que l'indice de boues est très bas 42ml/g (pour une bonne croissance de boues, l'IB doit être entre 80ml/g et 150ml/g) ce qui favorise la croissance dispersée des boues et donc une élimination des boues au niveau du clarificateur moins efficace que rapide. Le IB n'est pas le seul problème puisque le ratio C/N/P est loin de la valeur nécessaire pour ce type de traitement qui doit être de 100/5/1 au lieu de 100/1.5/0.6 ceci indique un apport non adéquat des nutriments injectés sous forme d'Urée et de Phosphate d'ammonium et par conséquent l'activité bactériologique ne sera pas optimale et le taux d'oxygène dissout qui se trouve à un niveau bas 2mg/l confirme la mauvaise digestion des bactéries hétérotrophe. Il faudra donc procéder à un ajustement de l'apport en nutriments et l'augmentation du taux d'oxygène dissout. L'indice de boues ne fait pas l'exception alors une

augmentation de la recirculation est primordiale. Sans oublier qu'on note déjà la présence d'un problème qui est le phénomène de moussage au niveau du bioréacteur.

2. Suivi des paramètres et calcul du rendement

Un suivi des différents paramètres de la STEP était nécessaire pour établir des valeurs permettant le calcul du rendement actuel de la station, d'identifier les éventuels problèmes et les points faibles et par la suite procéder à l'optimisation du rendement en agissant précisément sur les paramètres influençant le procédé de traitement.

Le suivi a été fait sur 30 jours et a permis d'évaluer le rendement de la station à savoir DCO, DBO5 et MES en terme de concentration (*tableau 6*). Quoique les paramètres Nt et Pt sont aussi d'une grande importance, ils n'ont pas été pris en considération à l'entrée de la STEP à cause de la faible teneur des effluents en éléments azoté et phosphaté.

Tableau 6 : Suivi des paramètres physico-chimiques de la STEP

	<i>Entrée Step</i>	<i>Réacteur biologique</i>	<i>Sortie Step</i>
<i>T° (°C)</i>	29.6	30.1	32.3
<i>pH</i>	10.83	7.9	7.49
<i>DCO (mgO/l)</i>	2420	3220	680
<i>DBO5 (mgO/l)</i>	1049	1845	269
<i>MES (mg/l)</i>	328	2560	98
<i>Nt (mg/l)</i>	9.5	23.1	4.08
<i>Pt (mg/l)</i>	4.3	10.4	2.10

A l'entrée de la STEP (*tableau 6*) on note d'une part un pH très basique du fait que l'eau est très riche en soude issue du cycle de lavage/rinçage des bouteilles et la température est moyennement élevée, d'autre part la DCO, DBO5 et les MES sont en grande concentration puisque l'eau est trop chargée. Le Nt et Pt sont en faible concentration. A la sortie (*tableau 6*) la température sont en valeur acceptable mais en ne peu dire autant de la DCO, de la DBO5 et des MES qui sont respectivement de 680mg/l, 269mgO/l et 98mg/l, ces dernières valeurs sont toujours dans les normes marocaines des rejets indirect cependant en terme de rendement ces

valeurs sont loin d'être idéals. Au niveau du réacteur biologique toutes les valeurs ont considérablement augmentées du fait que la liqueur mixte est trop chargée en éléments organique et aussi en matières en suspension.

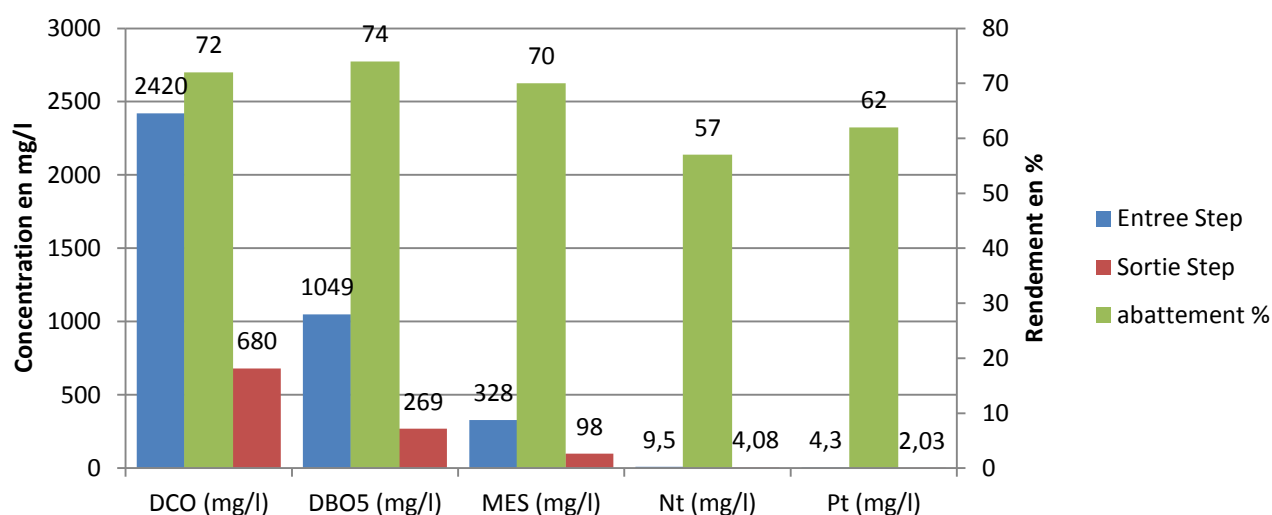
Les valeurs enregistrées de ces paramètres ont permis de calculer le rendement ou les taux d'abattement qui sont atteint par les paramètres actuels :

Tableau 7 : taux d'abattelements des paramètres physico-chimique avant l'optimisation

<i>Paramètres</i>	<i>Abattement (%)</i>
<i>DCO</i>	72
<i>DBO₅</i>	74
<i>MES</i>	70
<i>Nt</i>	57
<i>Pt</i>	62

Ce faible rendement de la station (*tableau 7 et Diagramme 1*) est expliqué par un apport en nutriment n'atteignant pas des valeurs satisfaisantes, donc un ajustement du ratio C/N/P à sa valeur indispensable 100/5/1, s'impose. Une mauvaise décantabilité des boues autrement dit une mauvaise coagulation et floculation est caractéristique d'une anomalie au niveau de l'injection du polyélectrolyte, il faudra donc commencer par trouver la dose optimale du polyélectrolyte à l'aide des essais de type jar-test et augmenter le taux de recirculation afin d'avoir une biomasse suffisante pour une bonne dégradation des matières organiques dissoutes.

Figure 10 : Taux d'abattement des paramètres physico-chimique avant optimisation



3. Optimisation de la dose du polyélectrolyte et du pH

Les expériences réalisées dans ce cas sont faites à l'aide du logiciel Nemrod qui est l'un des outils des plans d'expérience actuels. Les expériences effectuées sont dans le (tableau 8) et ils sont au nombre de 11 avec trois répétitions au centre pour des résultats plus précis.

Tableau 8 : Matrices d'expériences

<i>N°Exp</i>	<i>[poly]</i>	<i>pH</i>	<i>R.DCO</i>	<i>R.MES</i>
	<i>g/l</i>		<i>%</i>	<i>%</i>
1	3.4	6.0	77.75	75.87
2	3.8	6.0	77.05	75.91
3	3.4	8.0	78.45	76.10
4	3.8	8.0	77.89	76.24
5	3.4	7.0	77.56	77.19
6	3.8	7.0	77.19	76.12
7	3.6	6.0	78.91	77.56
8	3.6	8.0	79.23	77.32
9	3.6	7.0	81.04	78.91
10	3.6	7.0	80.81	79.29
11	3.6	7.0	81.12	79.65

On note qu'avec un pH de 7 et une concentration en polyélectrolyte de 3.6g/l le rendement est meilleurs que se soit pour la DCO ou les MES ce qui se traduit par le chemin optimal en combinant les deux facteurs.

3.1. Analyse des résultats et les effets des facteurs sur l'abattement de la DCO

Tableau 9 : Les coefficients du modèle

Source de variation	Somme des cares	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	20.3082	5	4.0616	156.8197	< 0.01 ***
Résidus	3.5706	5	0.7141		
Validité	3.5188	3	1.1729	45.2872	2.17 *
Erreur	0.0518	2	0.0259		
Total	23.8788	10			

D'après le (tableau 9) ci-dessus, on constat que :

- ANOVA 1 validé ($P < 5\%$), donc le modèle est descriptif.
- ANOVA 2 validé ($P > 5\%$), donc le modèle est prédictif.

Remarque:

- Les étoiles montre le degré de significativité de la valeur en.
- ANOVA 1 = Régression et ANOVA 2 = Validité (tableau 9)
- ANOVA = Analyze Of Variance

Tableau 10 : Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1 : R.DCO

Ecart Type de la réponse	0.16093477
R2	0.850
R2A	0.701

Le coefficient de corrélation linéaire multiple quantifie de manière claire (tableau 10), la très bonne qualité de l'ajustement (puisque $R^2 = 0.85$). Ce coefficient R^2 qui est le rapport entre la somme des carrés des écarts (entre les valeurs calculées et la moyenne des valeurs) / somme des carrées des écarts (entre les valeurs expérimentales et la moyenne des valeurs), nous permet de conclure que notre modèle postulé permet d'expliquer 85% du phénomène étudié, le 15% qui reste est dû aux résidus. De même le coefficient R^2A qui est égal à 0.701 donne une idée sur l'ajustement du modèle, ce qui traduit une bonne qualité de l'ajustement de l'estimation des coefficients de l'équation.

Tableau 11 : Les coefficients du modèle

Nom	Coefficient	F.Inflation	Ecart-type	t.exp.	Signif. %
<i>b0</i>	80.499		0.082557795	975.07	< 0.01 ***
<i>b1</i>	-0.272	1.00	0.065701344	-4.13	5.4
<i>b2</i>	0.310	1.00	0.065701344	4.72	4.21 *
<i>b1-1</i>	-2.389	1.08	0.10111224	-23.62	0.179 **
<i>b2-2</i>	-0.694	1.08	0.10111224	-6.86	2.06 *
<i>b1-2</i>	0.035	1.00	0.080467385	0.43	70.6

Ce (tableau 11) montre que:

- L'effet de l'interaction entre le polyélectrolyte et le pH influence très significativement sur l'élimination de la DCO.
- L'effet du facteur pH sur l'élimination de la DCO est faible.
- L'élimination de la DCO est notable par le polyélectrolyte.
- Les effets quadratiques influencent moyennement le polyélectrolyte.

Tableau 12 : Tableau des résidus : réponse : R.DCO

N°Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	dU	Student-R	R-Student	D-Cook
1	77.750	77.414	0.336	0.794	4.602	0.852	13.590
2	77.050	76.800	0.250	0.794	3.415	0.608	7.487
3	78.450	77.964	0.486	0.794	6.654	1.376	28.421
4	77.890	77.490	0.400	0.794	5.468	1.053	19.193
5	77.560	78.382	-0.822	0.509	-7.292	-1.585	9.178
6	77.190	77.839	-0.649	0.509	-5.755	-1.125	5.717
7	78.910	79.496	-0.586	0.509	-5.193	-0.986	4.656
8	79.230	80.116	-0.886	0.509	-7.853	-1.799	10.646
9	81.040	80.499	0.541	0.263	3.913	0.707	0.911
10	80.810	80.499	0.311	0.263	2.248	0.390	0.301
11	81.120	80.499	0.621	0.263	4.492	0.828	1.201

Le (tableau 12) clarifie l'étude des résidus qui permet de juger de manière plus précise, c'est-à-dire expérience par expérience, la qualité de l'ajustement réalisé, la comparaison entre les colonnes « Yexp » (réponses mesurées) et « Ycalc » (réponses prédites par le modèle) confirme que l'ajustement est d'une bonne qualité. Si l'interprétation a été bien faite, le modèle doit bien représenter les réponses mesurées, il est important d'observer comment les résidus se répartissent en fonction des réponses prévus, les résidus d'un bon modèle doivent être distribués aléatoirement autour de zéro et ne pas dépendre de la valeur de la réponse. Cette analyse des résidus ne fait pas apparaître des dispositions remarquables (figure 3 et 4) (des résidus de plus en plus élevés lorsque la réponse augmente).

Figure 11: Etude des résidus de la réponse (nuage de point) : Y1 : R.DCO

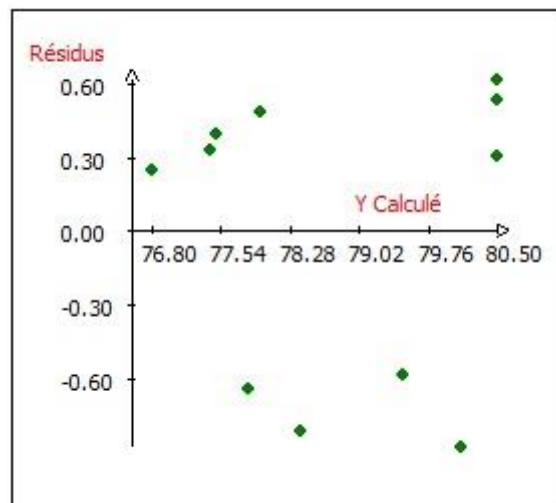
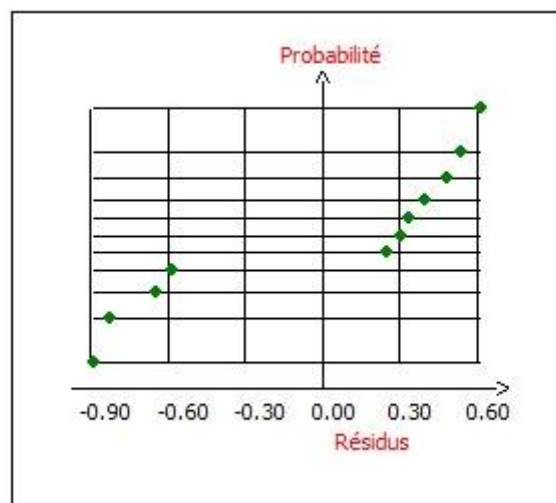


Figure 12 : Etude des résidus de la réponse (droite d'HENRY) : Y1 : R.DCO



3.2. Analyse des résultats et les effets des facteurs sur l'abattement de la MES

Tableau 13 : Analyse de la variance : réponse Y2 : R.MES

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	18.3360	5	3.6672	10.4777	< 0.01 ***
Résidus	1.7500	5	0.3500		
Validité	1.4761	3	0.4920	3.5933	22.5
Erreur	0.2739	2	0.1369		
Total	20.0860	10			

D'après le (tableau 13) ci-dessus, on constat que :

- ANOVA 1 validé ($P < 5\%$), donc le modèle est descriptif.
- ANOVA 2 validé ($P > 5\%$), donc le modèle est prédictif.

Tableau 14 : Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y2 : R.MES

Ecart Type de la réponse	0.59160946
R2	0.913
R2A	0.826

Le coefficient de corrélation linéaire multiple quantifie de manière claire (tableau 14), la très bonne qualité de l'ajustement (puisque $R^2 = 0.913$). Ce coefficient nous permet de conclure que notre modèle permet d'expliquer 91% du phénomène étudié, les 9% qui restent sont dû aux résidus. De même le coefficient R^2A qui est égal à 0.826 donne une idée sur le bon ajustement du modèle, ce qui traduit une bonne qualité de l'ajustement de l'estimation des coefficients de l'équation.

Tableau 15 : Les coefficients du modèle

Nom	Coefficient	F.Inflation	Ecart-type	t.exp.	Signif. %
b0	79.027		0.30348925	260.39	< 0.01 ***
b1	-0.148	1.00	0.24152355	-0.61	56.6
b2	0.053	1.00	0.24152355	0.22	83.4
b1-1	-1.987	1.08	0.3716969	-5.35	0.307 **
b2-2	-1.202	1.08	0.3716969	-3.23	2.31 *
b1-2	0.025	1.00	0.29580473	0.08	93.6

On peut aussi conclure du (tableau 15) :

- L'effet de l'électrolyte et du pH sur les MES est très significative.
- Les interactions entre le polyélectrolyte et le pH n'ont pas d'effet remarquable.
- Les effets quadratiques des facteurs influencent significativement sur les MES.

Tableau 16 : Tableau des résidus : réponse Y2 : R.MES

N°Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	dU	Student-R	R-Student	D-Cook
1	75.870	75.958	-0.088	0.794	-0.326	-0.295	0.068
2	75.910	75.611	0.299	0.794	1.113	1.148	0.796
3	76.100	76.014	0.086	0.794	0.319	0.288	0.065
4	76.240	75.768	0.472	0.794	1.759	2.547	1.985
5	77.190	77.188	0.002	0.509	0.005	0.004	0.000
6	76.120	76.891	-0.771	0.509	-1.860	-2.999	0.597
7	77.560	77.771	-0.211	0.509	-0.510	-0.468	0.045
8	77.320	77.878	-0.558	0.509	-1.346	-1.507	0.313
9	78.910	79.027	-0.117	0.263	-0.230	-0.207	0.003
10	79.290	79.027	0.263	0.263	0.518	0.476	0.016
11	79.650	79.027	0.623	0.263	1.227	1.313	0.090

D'après le (tableau 16), la comparaison entre les colonnes « Yexp » (réponses mesurées) et « Ycalc » (réponses prédites par le modèle) confirme que l'ajustement est d'une bonne qualité.

Figure 13: Etude des résidus de la réponse (nuage de point) : Y2: R.MES

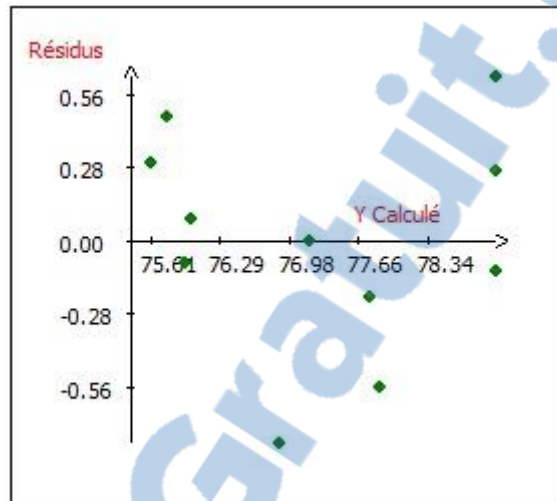
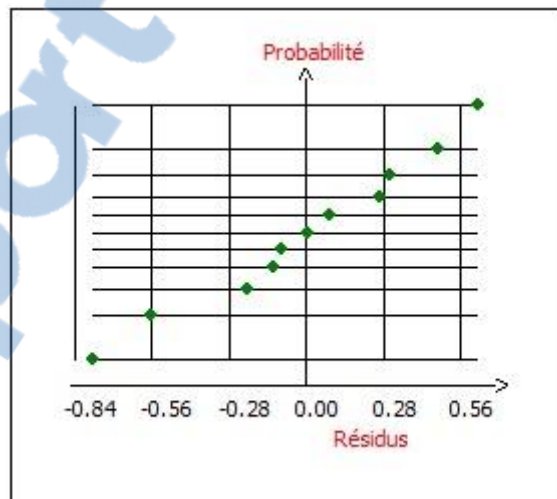


Figure 14: Etude des résidus de la réponse (droite d'HENRY) : Y2: R.MES



La (figure 5) illustre la répartition aléatoire des résidus autour de zéro et la (figure 6) affirme que les résidus suivent la droite d'Henry, d'où une bonne répartition.

3.3. Conclusion :

D'après les résultats obtenus par le logiciel NemrodW et par l'expérience on peut conclure que le modèle mathématique associé à l'étude de l'épuisement pour les deux réponses est statistiquement **validé**. Validé et donc le chemin optimal est décrit dans les tableaux 17 et 18 :

Tableau 17 : Coordonnées du maximum

Variable	Valeur	Facteur	Valeur
X1	0.722548	[poly]	3.7
X2	0.144249	pH	7.1

Tableau 18 : Caractéristiques du maximum

Réponse	Nom de la réponse	Valeur	di %	Poids	di min %	di max %
Y1	R.DCO	79.09	100.00	1	92.07	100.00
Y2	R.MES	77.87	100.00	1	100.00	100.00
	DESIRABILITE		100.00		92.07	100.00

4. Ajustement du ratio C/N/P

La concentration des différents éléments nutritifs dans les eaux usées doit être équilibrée (ratio C/N/P) et correspondre aux besoins des bactéries qui se trouvent dans les boues activées. Cela est primordial pour l'efficacité des processus de décomposition biologique. Dans le cas d'une épuration des eaux usées de type aérobie, le ratio C/N/P doit être situé entre 100/10/1 et 100/5/1.

Grâce aux méthodes actuelles, l'élimination des composés azotés et phosphorés excédentaires dans les eaux usées ne pose pas de problème majeur.

Toute carence d'un élément nutritif principal dans les eaux usées, au niveau de la zone d'arrivée de la phase de purification biologique, peut poser divers problèmes comme le cas présent ou le ratio est de 100/1.5/0.6. Une dénitrification efficace suppose une certaine

proportion en composés carbonés facilement biodégradables. Dans les eaux usées urbaines pré décantées, si le ratio descend au dessous de 100/5/1, le processus de dénitrification ne s'effectue pas complètement, ce qui se traduit par des valeurs de process accrues en termes de nitrates.

On a donc augmenté l'injection de l'urée et du phosphate d'amomum à 7 l/h et à 2 l/h respectivement depuis les pompes doseuses et les résultats sont dans le (tableau 19).

Tableau 19 : Valeurs paramètres avec ratio 100/1.5/0.6 et le ratio 100/5/1

Ratio C/N/P Paramètre	100/1.5/0.6	100/5/1
T (°C)	29	30
pH	7.6	7.8
DCO (mg/l)	687	549
DBO5 (mg/l)	269	215
MES (mg/l)	123	82
Nt (mg/l)	9.3	12
Pt (mg/l)	4.2	6.4
MES liqueur mixte (mg/l)	2551	2610

Avant l'augmentation des injections d'urée et du phosphate d'ammonium les concentrations de la DCO, la DBO₅ et les MES étaient respectivement de 687mg/l, 269mg/l et 123mg/l, ces valeurs respectent les normes marocaines des rejets indirects mais elles peuvent atteindre des valeurs encore basses avec l'ajustement du ratio C/N/P.

Après l'augmentation des injections à 7 l/h et à 2 l/h respectivement de l'Urée et du Phosphate d'ammonium les concentrations des paramètres DCO, DBO₅ et MES on été baissées pour atteindre respectivement 549mg/l, 215mg/l et 82mg/l nettement plus bonnes qu'avec un ratio C/N/P non ajusté.

Quand aux nutriments, étant a basses concentrations 6.8mg/l pour le Nt et 2.6mg/l pour le Pt dans les eaux brutes, ont étaient augmenté respectivement jusqu'a 12mg/l et 6.4mg/l. Des valeurs qui restent toujours dans les normes marocaines pour les rejets indirects.



Cependant leurs concentrations on connu une forte augmentation au niveau du réacteur biologique de 23.1mg/l pour le Nt et 10.4mg/l de Pt à cause des injections améliorées, des concentrations efficaces pour l'activité de la biomasse épuratrice.

5. Augmentation du taux de recirculation

La concentration en bactéries est maintenue grâce à la recirculation des boues. Avec une commande par automate, pour un taux de recirculation de 18% d'un total de 50% de boues stockées qui prend environ entre 1h et 1h30min, au délais de 2h de stockage, la formation des bactéries filamenteuses est favorisée ce qui diminue le taux d'oxygène dissout des boues et par conséquent l'asphyxie des bactéries nécessaires a la biodégradation.

La recirculation permet de maintenir le taux de biomasse épuratrice à une concentration suffisante pour une biodégradabilité efficace. Le rapport entre la pollution à traiter et la quantité de boues en aération définit l'âge des boues. Une partie des boues décantées est régulièrement extraite du système pour éviter une concentration en boues trop élevée dans le bassin d'aération et d'éviter la prolifération des bactéries filamenteuses car le développement de la biomasse algale n'est pas recherché. L'oxygénation artificielle du milieu profite largement aux bactéries au détriment des populations algales.

Pour améliorer encore plus la biodégradabilité au niveau du bioréacteur on a augmenté la recirculation de 18% à 25% des boues et on a enregistré les résultats regroupés dans le (tableau 20) suivant.

Tableau 20 : valeurs des paramètres avec recirculation 18% et 25%

<i>Recirculation</i> <i>Paramètre</i>	<i>Recirculation 18%</i>	<i>Recirculation 25%</i>
<i>T (°C)</i>	30	31
<i>pH</i>	7.8	7.7
<i>DCO (mg/l)</i>	673	490
<i>DBO5 (mg/l)</i>	271	183
<i>MES (mg/l)</i>	117	75
<i>Nt (mg/l)</i>	9.7	5.2
<i>Pt (mg/l)</i>	4.9	1.7
<i>MES liqueur mixte (mg/l)</i>	2491	3680

Ce tableau montre qu'avant l'ajustement du pourcentage de recirculation des boues de 18% à 25%, les valeurs réceptives de la DCO, DBO₅ et MES étaient de 673mg/l, 271mg/l et 117mg/l et qui ont baissées respectivement jusqu'à 490mg/l, 183mg/l et 75mg/l, des valeurs qui sont dans les normes marocaines de rejets indirects et qui sont meilleurs qu'avec un taux de recirculation de 18%. Cependant, et contrairement au cas d'ajustement du ratio C/N/P, les concentrations respectives de Nt et du Pt qui ont étaient de 7.5mg/l et 2.9mg/l, ont moyennement chutées pour atteindre 5.2mg/l pour le Nt et 1.7mg/l pour le Pt une baisse expliquée par la forte densité en biomasse bactérienne et donc une consommation accrue des éléments nutritifs déjà présents dans les eaux et ceux apportés par le ratio C/N/P non ajusté de 100/1.5/0.6.

6. Ajustement : ratio C/N/P et taux de recirculation

Les essais précédents ont permis d'évaluer l'efficacité de chaque paramètre isolé et donc logiquement en combinant les deux paramètres à savoir un ratio C/N/P de 100/5/1 et un taux de recirculation de 25% on obtiendra une élimination plus importante de la MES et de la

pollution organique. Les résultats obtenus sont présentés dans le (*tableau 21*) en comparaison avec la combinaison ratio C/N/P-taux de recirculation initial (100/1.5/0.6-18%)

Tableau 21 : valeurs des paramètres avec les ajustements 100/1.5/0.6 – 18% et 100/5/1 - 25%

<i>Ratio C/N/P - Recirculation</i>	<i>100/1.5/0.6 - 18%</i>	<i>100/5/1 - 25%</i>
<i>Paramètres</i>		
<i>T°</i>	31	29
<i>pH</i>	7.6	7.1
<i>DCO</i>	699	359
<i>DBO5</i>	278	140
<i>MES</i>	113	53
<i>Nt</i>	9.4	7.9
<i>Pt</i>	4.1	3.1

Ces valeurs obtenus pour une recirculation de 25% et un ratio C/N/P de 100/5/1 indiquent une nette diminution des valeurs respectives de la DCO, DBO₅ et les MES de 359mg/l ,140mg/l et 53mg/l. Ces valeurs sont d'un rapport de ½ par rapport à la charge initial de l'eau avec la combinaison ratio 100/1.5/0.6 – recirculation 18%.

On ne peut pas dire autant de l'évolution des concentrations respectives 7.9mg/l et 3.1mg/l de Nt et de Pt qui ont connues une augmentation moyenne, mais qui sont moins élevées par rapport a l'ajustement du ratio C/N/P tout seul a cause de la densité élevé en biomasse de la liqueur mixte due au pourcentage élevé des boues recirculées.

Toutefois les résultats obtenus sans nettement meilleurs qu'initialement et qui respectent les normes marocaines des rejets indirects.

7. Taux d'abattement des différents paramètres

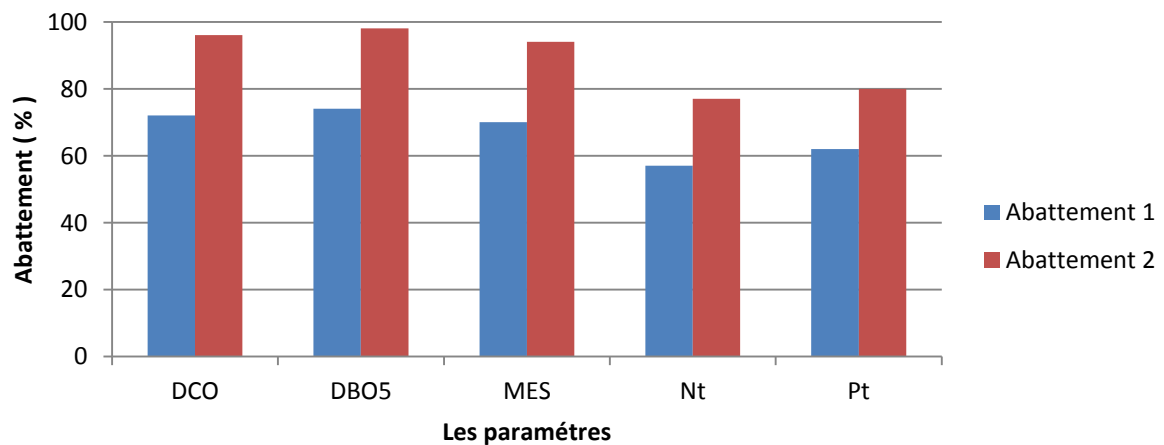
Dans le tableau 22, on présente les valeurs de tous les paramètres à l'entrée et à la sortie de la STEP après l'application de tous les nouveaux paramètres à savoir : l'optimum du polyélectrolyte, l'augmentation de la recirculation et l'ajustement du ratio C/N/P.

Tableau 22: pourcentage d'abattement des paramètres après optimisation

	Entrée Step	Sortie Step
<i>T (°C)</i>	29.6	29
<i>pH</i>	10.83	7.2
<i>DCO (mg/l)</i>	2420	97
<i>DBO5 (mg/l)</i>	1049	22
<i>MES (mg/l)</i>	328	18
<i>Nt (mg/l)</i>	9.5	2.18
<i>Pt (mg/l)</i>	4.3	0.84

Tableau 23: Pourcentage d'abattement des paramètres après optimisation

Paramètres	Abattement (%)
<i>DCO</i>	96
<i>DBO₅</i>	98
<i>MES</i>	94
<i>Nt</i>	77
<i>Pt</i>	80

Figure 15 : Taux d'abattement des paramètres physico-chimique après optimisation

Le tableau 23 et le diagramme 2 affiche les nouveaux taux d'abattement des principaux paramètres de la pollution et de la charge polluante dans les effluents de la CBGS après l'application de tous les paramètres optimaux trouvés pendant cette études.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail , nous avons essayé d'améliorer le rendement de la STEP de la CBGS en terme de dépollution des effluents générés par cette industrie agroalimentaire. Dans notre démarche, nous avons appliqué la méthode des plan d'expériences en utilisant le logiciel NemrodW optimiser le déroulement des essais. Le suivi des paramètres de fonctionnement de la STEP a montré une inefficacité du traitement biologique qui se traduit par des rendements trouvés : 72% pour la demande chimique en oxygène (DCO), 74% pour la demande biologique en oxygène en cinq jour (DBO₅) et 70% pour les matières en suspension (MES).

Les points faibles détectés au niveau de la STEP sont : le très faible indice des boues (42ml/g) qui doit être compris entre 80ml/g et 150ml/g et un ratio C/N/P qui est de 100/1.5/0.6 mais qui doit être primordiallement de 100/5/1 pour une meilleure biodégradabilité. L'optimisation du traitement a porté premièrement sur des expérimentations avec le logiciel NemrodW avec 2 facteurs (la concentration du polyélectrolyte et le pH), 2 réponses (DCO et MES) et 11 essais pour l'obtention de la dose optimale du polyélectrolyte qui était de 3.7g/l avec un pH ajusté à 7. Ensuite un ajustement du ratio C/N/P à 100/5/1 et un taux de recirculation de 25% on permis d'atteindre des taux d'abattement de la pollution de plus de 90% pour la DCO, la DBO₅ et les MES et de plus de 75% concernant le Nt et le Pt.

L'application de tous les nouveaux paramètres optimaux dans la STEP a permit d'abaisser la charge polluante des effluents de 2420 mg/l jusqu'à 97 mg/l soit 96% pour la DCO, de 1049 mg/l de DBO₅ jusqu'a 22mg/l soit 98% d'abattement et de 94% de rendement concernant les MES qui ont baissés de 328 mg/l à 18 mg/l en terme de concentration. Si ces nouveaux paramètres on permis d'abaisser la charge polluante des eaux, ils ont en revanche due l'enrichir d'avantage en éléments nutritifs à savoir l'azote et le phosphore qui ont connu une hausse respective depuis des concentrations de 7.2 mg/l et 2.5 mg/l à 10.1 mg/l et 4.3 mg/l, des valeurs toujours en dessous des limites imposées par la réglementation pour les rejets industriels indirects.



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: MOUFAKKIR Abdelali

Année Universitaire : 2013/2014

Titre: Optimisation du rendement d'une STEP de traitement des rejets liquides industriels

Résumé

Le présent travail est réalisé au sein de la compagnie des boissons gazeuses du sud (CBGS) de la ville de Marrakech. Dans cette industrie, la qualité reste un élément important tout au long du processus de fabrication depuis la matière première jusqu'aux rejets issus du même processus.

Ce travail porte sur le suivi et le diagnostic de la station d'épuration des eaux usées par boues activées en vu d'y apporter d'éventuelles améliorations pour améliorer son rendement.

Dans la pratique, le diagnostic a révélé un faible rendement de la station qui est en dessous de 75% alors qu'il doit normalement dépasser les 95%. Ce faible rendement de la STEP est dû à la croissance dispersée des boues, au faible apport des nutriments au niveau de l'étape de la biodégradation et à une biomasse insuffisante.

En vu d'améliorer l'abattement des paramètres : DCO, DBO₅ et MES, nous nous sommes intéressés à l'étude des paramètres influençant le rendement de la station par : **i)** Réalisation des essais de jar-test complétés par un plan d'expérience basé sur une matrice de surface de réponses (MSR), **ii)** Ajustement des concentrations de l'azote et du phosphore dans le bioréacteur, calculé par le ratio C/N/P qui doit être dans un rapport 100/5/1. **iii)** Apport de la biomasse dans le bassin d'aération pour le maintien d'une biodégradabilité stable et efficace en assurant une recirculation de 25% des boues éliminées depuis le clarifloculateur.

L'application du nouveau chemin optimal tracé, a permis d'atteindre les taux d'abattement désirés à savoir un pourcentage supérieure à 95% pour les principaux paramètres : DCO, DBO₅ et MES tandis que pour le Nt et Pt le gain était entre 20% et 25% de plus que les taux initiaux.

Mots clés : STEP, Boues activées, Optimisation, Rendement, Ratio C/N/P, DCO, DBO₅, MES.