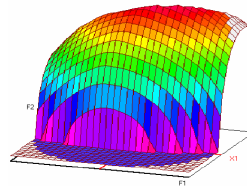




Année Universitaire : 2009-2010



Master Sciences et Techniques CAC Agiq
**Chimométrie et Analyse Chimique : Application à la gestion industrielle
de la qualité**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Optimisation générale du processus de traitement des
eaux résiduaires de la CBGN**

Présenté par:

BAHI Bouthayna

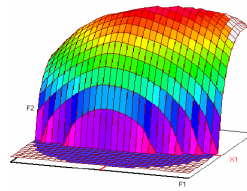
Encadré par:

- El Houcine AIT HSINE Entreprise CBGN
- Fouad KHALIL FST Fès

Soutenu Le 21 Juin 2010 devant le jury composé de:

- M^r. F. KHALIL
- M^r. E.AIT HSINE
- M^r. M. IJJAALI
- M^r. E. H.LAMCHARFI
- M^r. E. M. EL HADRAMI

Stage effectué à : la Compagnie des Boissons Gazeuses du Nord



Master ST CAC Agiq

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

Nom et prénom: **BAHI Bouthayna**

Année Universitaire : **2009/2010**

Titre: **Optimisation générale du processus de traitement des eaux résiduaires de la CBGN**

Résumé

Dans le but de répondre aux besoins de l'industrie agro-alimentaire en matière de traitement des eaux usées, la Compagnie des Boissons Gazeuses du Nord de Fès (CBGN) a installé une station de traitement biologique pour traiter ses effluents.

Dans ce cadre, mon travail au sein de la station d'épuration des eaux résiduaires de la CBGN a consisté à optimiser la consommation électrique, la consommation de l'eau de la RADEEF ainsi que la consommation des produits chimiques utilisés dans les différentes étapes de traitement.

Pour la consommation électrique, le passage de l'utilisation de trois suppresseurs à l'utilisation de deux suppresseurs a permis une nette diminution de la consommation électrique.

Pour la consommation de l'eau de la RADEEF, l'installation d'un filtre à la sortie du bassin de désinfection, aura comme résultat la diminution de la consommation de l'eau d'à peut près 85%.

Pour la consommation des produits chimiques et en se basant sur la méthodologie des plans d'expériences, on a réussi à optimiser ces trois produits chimiques tout en respectant un rendement (DCO) > 90%.

Mots clés: traitement des eaux résiduaires industrielles, STEP CBGN, optimisation, plans d'expériences, plan de BOX-BEHNKEN.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents pour leur soutien moral et leur sacrifice infini tout au long de mon parcours d'études.

Mes sœurs et à mon frère qui j'aime très fort et auxquels je souhaite une longue vie pleine de réussite et de bonheur.

Ma sœur Basma et à mes meilleurs amis : Ouidiane, Hanae et Omar.

Toute ma famille et spécialement à mon oncle Zerhouni Mohammed.

Mes amis de formation, avec lesquels j'ai passé des moments agréables.

Tous les professeurs qui ont fait de leurs mieux afin de nous offrir de bonne formation et qui se sont montrés très compréhensifs à notre égard.

Tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail et spécialement à Aziz et Youssef.

A ceux qui me sont chers.



Remerciement

Je tiens, tout d'abord, à exprimer ma profonde gratitude ainsi que mes sincères remerciements à Mr MOSSDAQ, le Directeur d'exploitation de la CBGN pour m'avoir accordé l'opportunité d'effectuer ce stage de projet de fin d'études au sein de cet honorable établissement.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr El Houcine AIT HSINE responsable management qualité, sécurité et environnement pour tous ses aides.

Je tiens à remercier Mr EL HADRAMI, professeur responsable de la formation, pour tous ses énormes efforts déployés afin de réussir cette formation.

Mes sincères remerciements s'adressent à mon encadrant, Mr Fouad KHALIL, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour le temps qu'il m'a consacré et leur précieux conseils.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr M. IJJAALI, Mr E. H.LAMCHARFI et Mr E. M. EL HADRAMI d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mes vifs remerciements à Mr Aziz et Mr Youssef, techniciens de la STEP de la CBGN pour leurs conseils, leur aide, leur disponibilité et leur gentillesse.

Je tiens aussi à exprimer mes plus sincères remerciements à Mr Ouahid El KHAMMAR, Mr Fahmi EL KHAMMAR, Mr Driss JELLOUQ, Mr Omar KHLOUF et Mr Salah HOMRANI pour leur encouragement, leur soutien, leur disponibilité et leurs précieux conseils.

Je remercie tout le personnel de la CBGN pour sa gentillesse, sa collaboration et son aide et spécialement Mr Ibrahim du service Laboratoire.

Enfin, je remercie tous les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I : Aperçu sur le problème de la pollution au niveau de la ville de Fès et de oued Sebou et description de la pollution générée par la CBGN	
A] Introduction.....	2
B] Pollution industrielle de la ville de Fès et de Oued Sebou.....	2
1- Pollution de la Ville de Fès.....	2
2- Pollution de oued Sebou.....	2
C] Sources et type de pollution générée par la CBGN.....	3
Chapitre II : La station d'épuration des eaux résiduaires industrielles de la CBGN	
A] Introduction.....	5
1- Choix du type de traitement.....	5
1.1- Bases du choix de traitement biologique à boues activées.....	5
1.2- Avantages et inconvénient d'un traitement par boues activées.....	5
2- Dimensionnement et étude d'impact de la station.....	5
2.1- Dimensionnement de la station.....	5
2.2- Etude d'impact environnementale et de sécurité.....	6
3- Description de la station.....	7
B] Descriptif du procédé de traitement des eaux résiduaires industrielles de la CBGN	
1- Prétraitement.....	7
2- Traitement.....	8
3- Traitement des boues activées.....	12
Chapitre III : Optimisation générale du processus de traitement des eaux résiduaires de la CBGN	
A] Problématique.....	15
B] Optimisation.....	16
1- Optimisation de la consommation de l'eau de la RADEEF.....	16
1.1- Utilisation de l'eau de la RADEEF.....	16
1.2- Optimisation.....	16
1.3- Conclusion.....	17
2- Optimisation de la consommation électrique.....	17
2.1- Utilisation de l'électricité.....	17
2.2- Optimisation.....	19
2.3- Conclusion.....	21
3- Optimisation des produits chimiques.....	21
3.1- Acide sulfurique.....	21
a) Utilisation.....	21
b) Optimisation.....	21
3.2- Urée, phosphate d'ammonium et flocculant DKFLOC.....	21
a) Utilisation.....	21
b) Rappel sur les plans d'expériences.....	22
c) Optimisation.....	24
Etape 1 : Définition de l'objectif de l'étude.....	24



Etape 2 : Sélection et description des facteurs contrôlables sur lesquels va porter l'expérimentation.....	24
Etape 3 : Choix de la réponse permettant d'atteindre l'objectif.....	24
Etape 4 : Recherche des facteurs de « bruit » qui pourraient être influents sur la réponse.....	24
Etape 5 : Postulation des hypothèses.....	26
Etape 6 : Description des contraintes.....	26
Etape 7 : Définition du domaine expérimental (niveaux des facteurs).....	27
Etape 8 : Postulation d'un modèle.....	27
Etape 9 : Dédution d'un plan d'expériences.....	28
Etape 10 : Génération du plan d'expérimentation.....	29
Etape 11 : Réalisation des expériences.....	29
Etape 12 : Traitement des données par un logiciel adéquat.....	31
Etape 13 : Interprétation de la validité du modèle postulé et de la significativité des coefficients.....	31
4- Réponse n°1.....	31
5- Réponse n°2.....	36
Etape 14 : Modélisation de la réponse si le modèle est validé.....	40
Etape 15 : Recherche de la solution optimale.....	40
Etape 16 : Validation expérimentale de la solution retenue.....	41
Etape 17 : Conclusion de l'étude.....	42
Conclusion générale.....	43
Annexe.....	44
Liste des abréviations.....	46
Bibliographie & webographie.....	47



Introduction

L'industrie a un impact potentiel sur la ressource en eau non seulement par ses prélèvements mais également par ses rejets. La pollution industrielle est le fait d'unités ponctuelles connues dont les plus importantes font l'objet d'une surveillance permanente. La plupart des industries ont conscience de ce problème et ont, depuis plusieurs années déjà, mis en œuvre des processus visant à économiser les quantités d'eau consommées et à améliorer les traitements avant rejet. Les polluants rejetés peuvent être des produits chimiques, des détergents, des métaux lourds, des hydrocarbures...

Dans le but de répondre aux besoins de l'industrie agro-alimentaire en matière de traitement des eaux usées, la Compagnie des Boissons Gazeuses du Nord de Fès (CBGN) a installé une station de traitement biologique pour traiter ses effluents.

Le coût dépensé par la CBGN pour l'épuration de ses rejets représente des pertes pures. Ce coût est évalué par 9,4 DH / m³ d'eau à traiter.

Dans ce cadre, mon travail au sein de la station d'épuration des eaux résiduaires de la CBGN a consisté à optimiser la consommation électrique, la consommation de l'eau de la RADEEF ainsi que la consommation des produits chimiques utilisés dans les différentes étapes de traitement.

Le présent travail est réparti en trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre donne un aperçu sur le problème de la pollution au niveau de la ville de Fès et de oued Sebou. La pollution générée par la CBGN sera aussi décrite dans ce chapitre.
- ✓ Le second chapitre est réservé à une présentation de la station d'épuration de la CBGN et à la description de son processus.
- ✓ Le troisième chapitre présente les résultats de l'étude de l'optimisation du processus de traitement des eaux résiduaires de la CBGN.



A] Introduction :

Au Maroc, la production croissante des déchets industriels entraîne des problèmes de pollution critiques. La nature de plus en plus complexe et hétérogène de ces déchets implique des difficultés pour leur traitement et leur gestion. Une grande partie est mise en décharge, sans précautions, ce qui constitue une réelle et permanente menace pour l'environnement.

Les effluents industriels sont une source de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines s'ils ne sont pas correctement traités.

➤ Les principaux types de pollutions industrielles de l'eau :

Les émissions aqueuses industrielles peuvent contenir de la pollution organique ou chimique ; et notamment des matières en suspension, diverses matières organiques, des produits azotés ou phosphorés, des produits toxiques,...

Elles émanent des industries agro-alimentaires, des industries papetières, des industries chimiques, des industries textiles, des industries des cuirs et peaux, des industries extractives, des industries minérales, des industries mécaniques, des industries de production d'énergie, des industries sidérurgiques et métallurgiques...

B] Pollution industrielle de la ville de Fès et de Oued Sebou :

1- Pollution de la Ville de Fès :

La ville de Fès est l'une des agglomérations les plus importantes du Royaume du Maroc. Sa population est chiffrée à 967.000 habitants en 2005 et sera de 1.190.000 en 2015. Elle est également un pôle industriel capital, soit le deuxième rang au Maroc avec plus de 400 unités industrielles en plus d'ateliers d'artisanat couvrant toutes les branches à savoir : l'agro-alimentaire (huileries, levurerie, boissons, conserveries,...), textile, tanneries, dinanderies,...etc. L'ensemble de ces unités est raccordé au réseau d'égout de la ville, ce qui pose d'énormes problèmes à la fois pour le réseau lui-même et pour le milieu récepteur qui est le Oued Sebou.

Les principales activités industrielles de la ville de Fès sont: l'huile d'olives (20 % production nationale), le textile (25 % production nationale) et l'industrie du cuir (40 % production nationale).

Les eaux usées industrielles et domestiques de la ville de Fès sont directement rejetées dans la rivière de Sebou sans aucun traitement préalable et elles contribuent à 40% de la pollution de Sebou.

La charge polluante totale générée en 2008 par la ville de Fès est évaluée à 1.200.000 équivalent-habitants, dont 51 % proviennent des rejets industriels, qui évoluera à 44 % à l'horizon 2015.

2- Pollution de oued Sebou :

Avec 6 millions d'habitants, une surface de 40.000 km² et une richesse hydrique importante constituée de 30% du potentiel national en eaux de surface et 20% en eaux profondes, le bassin de



Sebou est l'un des bassins les plus importants à l'échelle nationale, mais le Sebou est aussi malheureusement l'oued le plus pollué du pays.

La qualité de ses eaux, après réception des eaux usées de Fès, est considérée hors classe, ne devant servir à aucune utilisation, situation qui engendre d'ailleurs des répercussions néfastes sur ce bassin et notamment sur les conditions d'irrigation, la santé, les conditions de potabilisation de l'eau et les conditions socio-économiques de la région.

Les sources de pollution de Oued Sebou sont :

- ✓ Les rejets domestiques ;
- ✓ L'activité industrielle ;
- ✓ L'activité agricole;
- ✓ Les décharges publiques.

L'existence de deux des principales plaines agricoles du pays ainsi que la multitude et la diversité des unités industrielles au niveau des grandes villes du bassin (Fès, Meknès, Kénitra, S. Kacem) sont les principales causes de la dégradation de la qualité des eaux du bassin. L'utilisation des engrais et des pesticides en périmètres irrigués dépassent le besoin des plantations et constituent donc une source de pollution.

La plus grande partie des rejets industriels organiques (DBO_5) est déversée dans le bassin de Sebou de l'océan atlantique. Le bassin du Sebou reçoit une pollution de :

- 209.000 tonnes de papier ;
- 80.000 tonnes d'huile d'olive (65% de la production nationale) ;
- 12.000 tonnes de cuir (60% de la production nationale) ;
- 3.300 tonnes de pétrole raffiné ;
- 1845 tonnes de sucre produit (50% de la production nationale) ;

ainsi qu'une pollution par le chrome (soit 56% de la quantité totale) provenant des tanneries.

Les pertes économiques annuelles dues à cette pollution, dont 40 % proviennent des eaux usées et industrielles de Fès, se chiffrent à plusieurs millions de DH.

C] Sources et type de pollution générée par la CBGN :

La compagnie des boissons gazeuses du Nord (CBGN) est une SA, son activité s'inscrit dans le domaine de l'agroalimentaire et plus précisément dans l'embouteillage de boissons.

Elle fabrique des boissons gazeuses de différents goûts (Coca-Cola Fanta ...), formes (PET- verre) et de différents volumes (20, 25, 35, 100, 150 et 200 cl).

Dans le processus de fabrication des boissons gazeuses, l'eau constitue un élément principal dans la chaîne industrielle. Le ratio d'eau de la CBGN est de l'ordre de 2.5 litres d'eau par litre de produit fini, c-à-d pour préparer 1 litre de boisson on a besoin de 2,5 litres d'eau. Cela implique que 60% d'eau consommée par la production est éliminée sous forme de rejets.

Ces rejets sont stockés dans une fosse avant d'être acheminés dans la fosse de collecte de la station d'épuration.



Les eaux résiduaires à traiter sont constituées par les eaux de :

- ❖ Lavage des filtres à sable, des filtres à charbon et des filtres polisseurs utilisés dans le traitement des eaux ;
- ❖ Régénération des adoucisseurs et du décarbonateur ;
- ❖ Lavage et rinçage des bouteilles en verre (laveuse n° 1 et n° 2) ;
- ❖ Lavage des équipements de préparation et de filtration du sirop simple (contimol, filtre à charbon, filtre à célite et cuve de stockage) ;
- ❖ Sanitation des équipements de préparation et de stockage du sirop fini ;
- ❖ Sanitation des mixeurs ;
- ❖ Sanitation des équipements servant au remplissage des bouteilles (conduites et soutireuse) ;
- ❖ Lavage du sol ;
- ❖ Laboratoire ainsi que les boissons qui restent dans les bouteilles après les analyses.

Les effluents de pollution rejetés sont variables tant sur le plan qualité que quantité. Ils dépendent :

- des heures de fonctionnement des lignes de verre (lavage des bouteilles) ;
- du changement de produits qui nécessite chaque fois une sanitation des équipements et des conduites ayant un contact avec le sirop fini et le produit fini ;
- du type de sanitation.

Ce qui montre clairement que les fluctuations des effluents dépendent fortement des programmes de production.

En terme de quantité, l'opération de lavage des bouteilles en verre et le système de sanitation sur place (CIP) après chaque changement de produit constituent les sources les plus importantes de rejet d'eaux.

Les flux de pollution rejetés sont de moyenne charge ($300 < \text{DCO} < 3000$) et il s'agit essentiellement d'une pollution organique dissoute biodégradable (à base de sucre). Les principaux polluants sont le saccharose et la soude.

En produisant des rejets riches en saccharose, l'opération de préparation des sirops est l'opération la plus polluante. Ces rejets chargés en sucre causent une augmentation de la DCO et de la DBO_5 et ils sont facilement biodégradables par des micro-organismes.

Les rejets générés par l'activité de lavage des bouteilles en verre présentent la principale source de la soude contenue dans les rejets et provoquant une augmentation du pH ($9 < \text{pH} < 12$).

➤ **Installation d'une station d'épuration :**

La prise de conscience environnementale et le respect des législations ont amené la CBGN à travailler dans le respect de son milieu environnant. Au sein de ce contexte, elle a lancé un projet de réalisation d'une station d'épuration assurant le traitement de ses eaux résiduaires avant qu'elles soient versées dans le réseau d'assainissement de la ville de Fès.



A] Introduction :

1- Choix du type de traitement :

1.1- 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 CBGN 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.

Le procédé de traitement choisi est dit « à boues activées » car l'ensemble des conditions favorables à une activité maximale des bactéries est mis en œuvre : un apport en oxygène suffisant, un apport en nutriments, une agitation permanente afin de favoriser le contact entre bactéries et pollution, une concentration élevée en bactérie pour augmenter l'efficacité du traitement.

1.2- 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 DBO_5 et la DCO) ;
- Superficie réduite, ce qui favorise l'intégration dans site de la société ;
- Procédé adapté aux charges organiques importantes.

Mais 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 ;

2- Dimensionnement et étude d'impact de la station :

2.1- Dimensionnement de la station :

La STEP a été dimensionnée pour traiter les eaux résiduaires purement industrielles de la CBGN. Les données sur les débits et les concentrations de l'effluent brut qui ont servi au dimensionnement sont données dans le tableau ci-dessous :



Tableau II-1 : Les caractéristiques des effluents bruts prises en compte lors du dimensionnement.

Caractéristiques de l'eau brute		
Paramètres	Unité	Valeur
Débit journalier moyen	m ³ /j	750
Débit horaire moyen	m ³ /h	31,3
Débit de point horaire	m ³ /h	100
DCO max	mg/l	2500
DBO ₅ max	mg/l	1200
MES max	mg/l	600
pH		12 max
Azote total	mg/l	12
Phosphore total	mg/l	4
Température moyenne	°C	30
Température maximale	°C	35

Ces spécifications techniques prises par la CBGN correspondent aux normes des rejets indirects selon le projet des normes marocaines.

Le tableau ci dessous représente les caractéristiques des eaux traitées (limites des rejets) prises en compte dans le dimensionnement de la station.

Tableau II-2 : Caractéristiques des rejets prises en compte dans le dimensionnement de la STEP

Garanties de traitement		
Paramètres	Unité	Valeur
DCO max	mg/l	1000
DBO ₅ max	mg/l	500
MES max	mg/l	600
pH		6 à 9

Alors que les normes des rejets exigées par Coca Cola sont plus sévères que celles prises en considération lors du dimensionnement.

Tableau II-3 : Les normes de Coca Cola pour les rejets des eaux épurées

Paramètres	Unité	Norme
Rendement (DCO) minimal	%	90
DBO ₅ max	mg/l	50
MES max	mg/l	25
pH		6,5 à 8



2.2- Etude d'impact environnementale et de sécurité:

Une étude d'impact est initialement une étude qui vise à apprécier les conséquences environnementales d'un projet pour en limiter ou atténuer ou compenser les impacts négatifs.

Avant le lancement du projet de la STEP, la CBGN a fait deux études d'impact (une environnementale et l'autre de sécurité), à l'aide d'un bureau d'étude, pour évaluer les impacts liés aux travaux de construction de la station, à savoir : l'impact sur le voisinage (bruit, poussière,...), sur l'espace naturel, sur la circulation, sur la sécurité du personnel, etc.

3- Description de la station :

La station est située à côté du site de production CBGN qui se trouve dans la zone industrielle « Quartier Industriel Sidi Brahim ».

Sa construction a nécessité 23 mois depuis janvier 2008. La direction des travaux et leur surveillance ont été assurées par le chef du projet, Ondeo IS (société responsable du dimensionnement), un bureau d'étude et un bureau de contrôle.

La station a coûté presque 3 000 000 DH et les travaux se sont terminés en décembre 2009. Depuis cette date, la station est en marche, elle assure le traitement des eaux résiduaires de la CBGN et verse dans le réseau d'assainissement de la ville de Fès.

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.

B] Descriptif du procédé de traitement des eaux résiduaires industrielles de la CBGN :

1- Prétraitement :

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 CBGN 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).

✓ Dégrillage :

Principe :



Le dégrillage 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.

But :

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.

Procédé :

Les eaux usées arrivent (par gravité) à la fosse n°1 de la station d'épuration par un collecteur. Après, elles passent de la fosse n°1 vers la fosse n°2 de relevage à travers un dégrilleur grossier chargé de retenir les déchets de plus de 2 cm (papiers, bouchons, matières plastiques, objets divers...).

Après nettoyage de grille, les gros déchets solides retenus sont évacués avec les ordures ménagères.

Les eaux contenues dans la fosse n° 2 sont ensuite relevées jusqu'au niveau du tamis fin à l'aide de deux pompes immergées.

✓ **Tamissage :**

Principe :

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

Procédé :

Après avoir traverser 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 puis ils sont évacués.

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

2- Traitement :

✓ **Homogénéisation :**

Principe :

Cette étape consiste à aérer l'effluent brut par diffusion d'air au fond du bassin à l'aide d'un suppresseur.

But :

Le but de cette étape de traitement primaire est :

- D'homogénéiser l'ensemble des eaux contenues dans le bassin d'homogénéisation.
- D'éviter la stagnation de l'eau brute et l'apparition de nuisances olfactives.

Procédé :



L'eau tamisée entrant au bassin d'homogénéisation (bassin construit en béton armé et qui a une capacité totale de 800 m³) est aérée. Cette aération est assurée par un des deux suppresseurs d'homogénéisation.

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

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.

✓ Ajout des nutriments et ajustement du pH :

Principe :

Les principaux éléments nutritifs nécessaires au développement bactérien sont : le carbone C, l'azote N et le phosphore P. Ces éléments existent naturellement dans les eaux à traiter mais le phosphore et l'azote existent avec des quantités insuffisantes. Donc, leur apport est nécessaire et il est assuré par l'ajout de l'urée et du phosphate d'ammonium.

L'eau brute provenant de la société est caractérisée par un pH basique entre 9 et 12. Ce pH est défavorable pour le développement des micro-organismes. Afin d'optimiser le développement de ces micro-organismes, le pH est ajusté entre 7 et 8 par l'ajout de l'acide sulfurique.

Procédé :

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 (H₂SO₄) à l'aide d'une pompe doseuse.

L'apport en azote et en phosphore est assuré par l'ajout de deux solutions de l'urée et du phosphate d'ammonium. Ces solutions sont préparées et stockées dans deux bacs de préparation agités de 500 litres.

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.

✓ Traitement biologique des effluents de l'usine: traitement à boues activées :

Principe :

Lors des procédés de traitement biologique, les mécanismes de dégradation se déroulant dans la nature sont intensifiés et optimisés.

Le traitement biologique consiste à :

- Dégrader les impuretés grâce à l'action d'une biomasse épuratrice, à laquelle doit être fourni l'oxygène nécessaire à son développement.



- Transformer la pollution en gaz et tissus cellulaires plus denses que l'eau qu'on peut séparer ensuite par floculation-flottation.

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

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

But :

L'épuration biologique a pour but d'éliminer la matière polluante biodégradable contenue dans les eaux résiduaires à traiter en la transformant en matières en suspension : micro-organismes et leurs déchets, plus facilement récupérables.

Le but de l'aération des réacteurs biologiques est :

- Assurer un brassage homogène du réacteur et par la suite un meilleur contact des micro-organismes avec les polluants organiques des eaux résiduaires ;
- Eviter la formation de dépôts ;
- Fournir l'oxygène suffisant à la multiplication des bactéries ;
- Maintenir la bonne activité des bactéries pour assurer une élimination optimale de la pollution.

Procédé :

Après ajout des nutriments et ajustement du pH, l'effluent provenant du bassin de répartition alimentaire, à l'aide de deux vannes manuelles, deux bassins rectangulaires construits en béton armé, d'une capacité de 400 m³ chacun et dans lesquels a lieu le traitement biologique. Ce sont les deux réacteurs biologiques ou les bioréacteurs.

Dans les deux réacteurs biologiques alimentés d'une part en eaux usées riches en nutriments et d'autre part en oxygène, les bactéries, en suspension dans l'eau, sont donc en contact permanent avec les matières polluantes dont elles se nourrissent et avec l'oxygène nécessaire à leur assimilation.

L'air comprimé, fourni par les deux suppresseurs des réacteurs biologiques, est injecté dans le fond des deux réacteurs biologiques, puis il est distribué par des diffuseurs d'air pour assurer une diffusion homogène. Chaque réacteur biologique comporte un oxymètre qui affiche le taux d'oxygène.

✓ **Floculation :**

Principe :

Le principe de floculation utilisé repose sur l'utilisation des polyélectrolytes qui ont pour effet une floculation extrêmement marquée par formation de ponts entre particules grâce aux longues chaînes ramifiées. Ces floculants sont des macromolécules à longue chaîne.

But :

Les boues en excès récupérées des bioréacteurs sont dirigées vers un traitement par flottation. Au préalable, ces boues sont floculées 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 floccs de boue résultent d'interactions complexes entre les diverses entités les constituant.

Pour améliorer la qualité du floc, il est prévu un poste de préparation du polymère, totalement automatisé, pour l'ajout de floculant. Cette installation est aussi commune à la préparation de polymère pour la déshydratation des boues. La séparation eau épurée-boues s'effectue ainsi de manière plus aisée.

Procédé :

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 floculant injecté par une pompe doseuse. Les boues sont alors agglomérées dans un floc.

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.

▪ Unité de préparation automatique du polymère :

La préparation du polymère est faite automatiquement à l'aide d'une unité de préparation des polymères POLYPACK APS-MAX-400.

La POLYPACK APS-MAX-400 est constituée d'un réservoir à 2 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.

✓ **Flottation (clarification) :**

Principe :



En sortie de réacteur, nous obtenons une liqueur mixte composée de boues floculées et d'eau épurée prête à être rejetée en milieu naturel. Elles sont séparées au sein du clarificateur.

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".

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 bars, 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 siphonée périphérique. Une fraction de l'eau flottée est reprise vers un système de pressurisation.

Procédé :

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 micro-bulles d'air apportées par l'eau pressurisé. Les macro-floccs 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 raclés, 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.

✓ **Désinfection et ajustement du pH:**

Principe :



La désinfection des eaux épurées est réalisée par une chloration par l'hypochlorite de sodium (eau de javel). Alors que l'ajustement du pH est assuré par l'acide sulfurique.

But :

La chloration a pour but l'élimination des micro-organismes des eaux traitées de la station d'épuration: germes pathogènes.

Le but de l'ajustement du pH est le respect des normes exigées par Coca Cola ($6,5 < \text{pH} < 8$) pour le rejet des eaux épurées.

Procédé :

La neutralisation finale du pH de l'eau épurée et sa désinfection sont réalisés dans un même bassin, construit en béton armé, appelé bassin de désinfection.

La mesure du pH du bassin de désinfection se réalise à l'aide d'une sonde de pH et son ajustement, entre 6,5 et 8, se fait automatiquement par ajout de l'acide sulfurique à l'aide d'une pompe doseuse.

L'ajout de l'hypochlorite de sodium se fait à l'aide d'une pompe doseuse.

Enfin, les rejets de la station d'épuration, sortant du bassin de désinfection, sont envoyés vers le réseau d'assainissement de la ville de Fès.

3- Traitement des boues activées :

Problématique des boues :

Tout traitement d'épuration conduit à la production de déchets. Ceux-ci sont collectés :

- ✓ au niveau du prétraitement : refus de dégrillage et du tamisage ;
- ✓ au niveau du flottateur : il s'agit des boues.

En volume comme en nuisance, les boues constituent les principaux déchets à traiter sur la station d'épuration et elles sont surtout constituées de bactéries mortes et de matière organique minéralisée. C'est le prix à payer pour rejeter une eau à peu près propre.

Les boues activées stockées dans le bassin des boues sont soit recirculées, soit elles subissent un traitement de déshydratation.

✓ Extraction et recirculation :

Principe :

La croissance de la biomasse au sein du bioréacteur n'est pas suffisante pour compenser la perte engendrée par le débit de sortie de la liqueur mixte. Pour conserver une concentration en biomasse constante dans le réacteur, une partie des boues du flottateur est recyclée vers les réacteurs biologiques.

But :

Le but de la recirculation des boues est :

- Assurer un ensemencement des boues dans les réacteurs biologiques.



- Maintenir une concentration en boues biologiques permettant une activité optimum de la biomasse épuratrice.

Procédé :

Les boues flottées, collectées en surface du flottateur, sont transférées gravitairement vers un bassin de stockage, en béton armé et de capacité de 20 m³, et homogénéisées par un agitateur immergé : c'est le bassin des boues. Les boues décantées sont éliminées du fond du flottateur par purge et ensuite envoyées vers le bassin des boues.

Une partie des boues du bassin des boues est recirculée vers les bioréacteurs afin d'y maintenir une biomasse épuratrice optimale. Cette recirculation est assurée par une pompe.

Lorsque le niveau du bassin des boues arrive à 45%, l'opération de recirculation des boues se déclenche automatiquement et elle s'arrête lorsque le niveau atteint 32%.

✓ **Extraction et déshydratation :**

Principe :

Le maintien de l'équilibre nécessaire entre la pollution à traiter et la quantité de biomasse nécessite l'extraction et la déshydratation des boues en excès stockées dans le bassin des boues.

Le surplus des boues est dirigé vers une centrifugeuse, où il sera déshydraté par injection de polymère, ce qui permet d'augmenter la siccité (teneur en matière sèche) des boues en vue de faciliter leur manutention ultérieure et de réduire les transports.

But :

La déshydratation permet :

- d'assurer un rejet de matière en suspension le plus réduit possible ;
- de faciliter la manutention des boues en excès ;
- d'alléger le transport et les coûts de mise en décharge ;
- et de réduire les nuisances olfactives et microbiologiques.

Procédé :

L'opération de déshydratation est lancée lorsque les MES dans les réacteurs dépasse 2 g/l.

Les boues en excès sont reprises par une pompe pour être acheminées vers la centrifugeuse avec un débit de 3 m³/h.

L'injection et le dosage du polymère est réalisé à partir d'une solution fille obtenu en faisant la dilution de la solution mère. Cette dernière est élaborée dans un bac de préparation à partir de sacs de polymère cationique solide (DKFLOC).

Les boues déshydratées sont récupérées dans une benne et mises en décharge. L'eau sortant de la centrifugeuse est envoyée vers la fosse de relevage pour être retraitée.

Le processus de déshydratation s'arrête lorsque le niveau dans le bassin des boues atteint 28%.



A] Problématique :

Afin d'évaluer le coût de traitement des effluents de la CBGN, j'ai fait un suivi entre le 25/02/2010 et le 07/05/2010.

Le tableau suivant représente le ratio et le coût de consommation matières premières à la STEP ainsi que le coût d'évacuation des BA déshydratées durant cette période.

Tableau III- 1 : Ratio et coût de consommation matières premières à la STEP entre le 25/02/2010 et le 07/05/2010



Désignation	Prix unitaire (DH/Kg)	Quantité	Ratio	Coût (DH)
Acide sulfurique (Kg)	1,265 DH/Kg	2880	0,21	3643,2
Phosphate d'ammonium (Kg)	4,8 DH/Kg	74	0,005	355,2
Urée 46% (Kg)	5,1 DH/Kg	89	0,006	453,9
Floculant DKFLOC (Kg)	76,48 DH/Kg	150	0,011	11472
Eau RADEEF (m ³)	8,5 DH/m ³	1050	0,076	8925
Electricité (KW)	0,82 DH/KW	125277	9,124	102727,14
Coût d'évacuation des BA déshydratées (DH)	1420			
Volume traité (m ³)	13731			
Coût total (DH)	128996,44			
Coût en DH /m ³ traité	9,4			

Le coût lié à l'évacuation des BA déshydratées est de 200 DH/voyage avec une fréquence moyenne de 3 fois par mois.

A partir de ce tableau, on peut tirer les informations suivantes :

- ✓ En moyenne, le volume traité par mois est de 5802 m³ ;
- ✓ Le coût dépensé par mois est de 54 538,8 DH ;
- ✓ Les produits chimiques participent avec un pourcentage de 12,34% en coût total ;
- ✓ L'eau de la RADEEF participe avec un pourcentage de 6,92% ;
- ✓ L'électricité participe avec un pourcentage de 79,64% ;
- ✓ L'évacuation des BA participe avec un pourcentage de 1,1%.

Remarques :

- Le prix total que j'ai calculé ne fait pas inclure le salaire des techniciens et le coût des pièces de rechange.
- Le Ratio = $\frac{\text{Quantité}}{\text{Volume d'eau traité}}$

Dans ce cadre, mon travail au sein de la station d'épuration des eaux résiduaires de la CBGN a consisté à optimiser la consommation électrique, la consommation de l'eau de la RADEEF ainsi que la consommation des produits chimiques utilisés dans les différentes étapes de traitement tout en respectant les performances épuratoires de la STEP.

B] Optimisation :

1- Optimisation de la consommation de l'eau de la RADEEF:

1.1- Utilisation de l'eau de la RADEEF :

A la STEP, l'eau de la RADEEF est utilisée :



- ✓ Au laboratoire ;
- ✓ Pour le lavage automatique périodique du tamis fin ;
- ✓ Pour le nettoyage ;
- ✓ Pour la préparation des solutions de l'urée et du phosphate d'ammonium ;
- ✓ Pour la dilution de la solution préparée du polymère (déshydratation) ;
- ✓ Pour l'arrosage des jardins.

1.2- Optimisation :

Trois propositions possibles:

1) Utilisation de l'eau traitée pour l'arrosage des jardins :

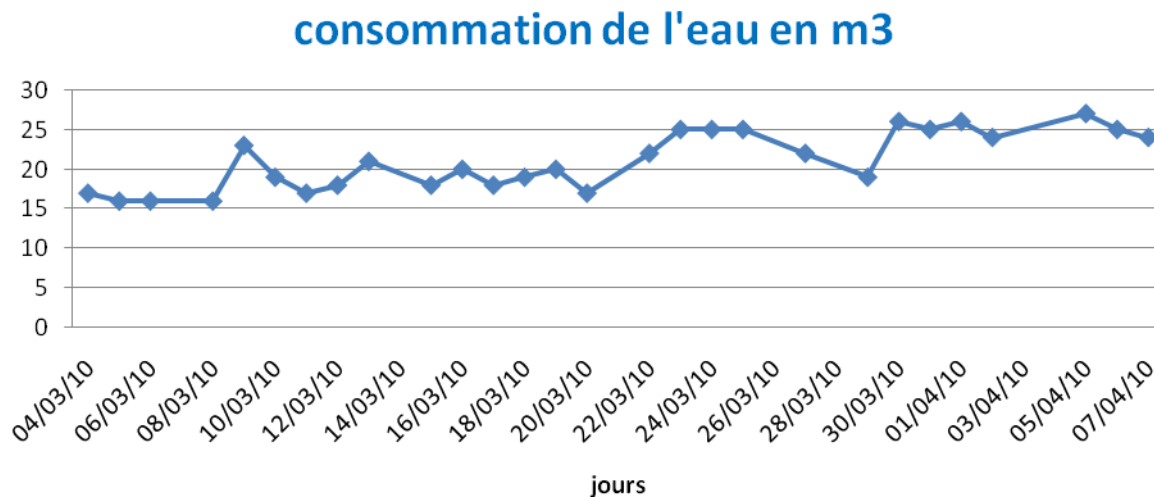
Cette proposition est déjà opérationnelle au sein de la société puisque l'eau épurée n'est pas destinée à l'irrigation des fruits ou des légumes. Elle est seulement utilisée pour l'arrosage des arbres et des plantes de la station.

2) Utilisation de l'eau traitée pour le lavage du tamis fin :

Cette deuxième solution a été appliquée du 14/04/10 au 23/04/10. Nous remarquons d'après les graphes suivants qui représentent la consommation journalière de l'eau de la RADEEF avant et après l'application de cette proposition, une nette diminution de la consommation de l'eau.

La consommation journalière moyenne de l'eau de la RADEEF est de 21 m³ avant l'adoption de la proposition 2. Cette consommation a nettement diminué une fois que l'eau traitée a été utilisée pour le lavage du tamis fin. On obtient d'après le graphe III-2 une valeur de 3 m³.

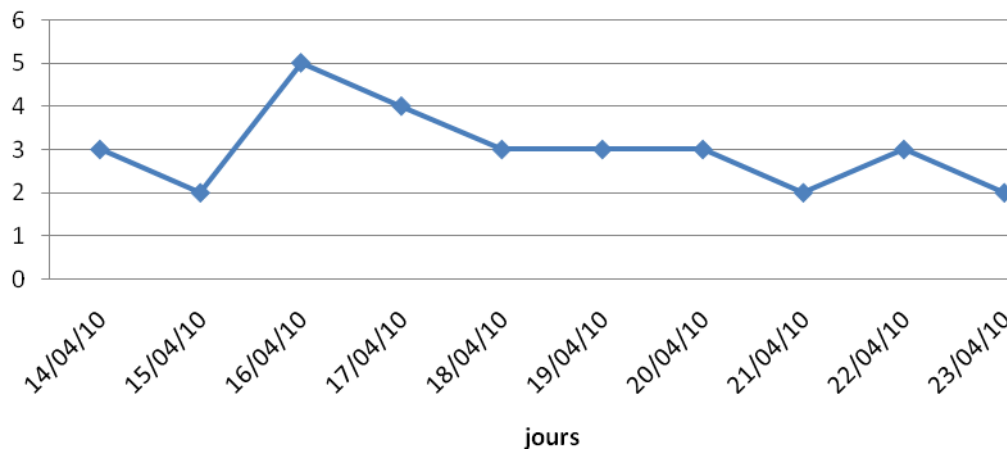
Cette solution a cependant présenté un problème qui est le colmatage de la conduite de l'eau traitée vers le tamis fin ainsi que le colmatage des buses du tamis par les MES.



Graphe III-1 : Consommation journalière de l'eau avant l'application de la proposition 2



consommation de l'eau en m3



Graphes III-2 : Consommation journalière de l'eau après l'application de la proposition 2

3) Utilisation de l'eau traitée pour le lavage de la centrifugeuse après chaque déshydratation : Cette proposition présente un risque de colmatage des électrovannes qui servent à contrôler l'écoulement de l'eau. Il est donc primordial d'éliminer ce risque de colmatage avant d'effectuer un essai.

1.3- Conclusion :

La première proposition est déjà appliquée à la station. Afin de pouvoir appliquer les deux autres propositions, il est recommandé de placer un filtre à la sortie du bassin de désinfection. Les MES contenues dans l'eau épurée, sortant du bassin de désinfection, seront donc éliminées et par la suite l'eau sera pompée vers le tamis fin ou vers la centrifugeuse sans risque de colmatage.

2- Optimisation de la consommation électrique :

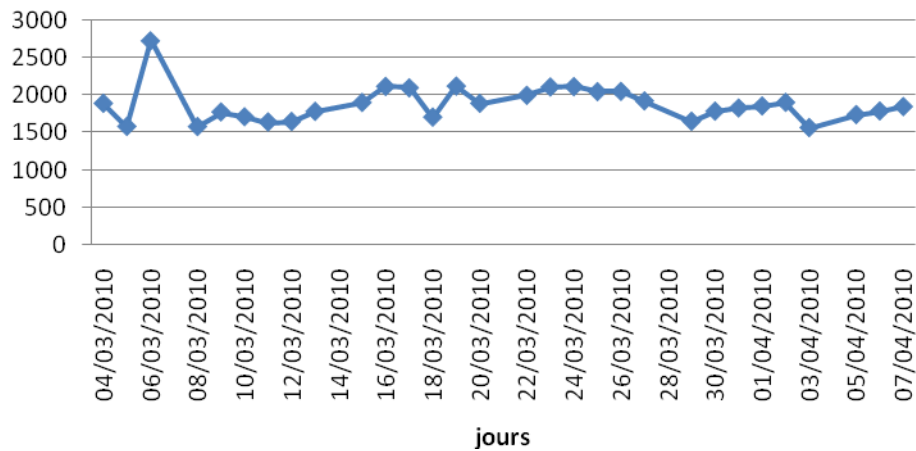
2.1- Utilisation de l'électricité :

Dans la station de traitement, l'électricité est utilisée pour :

- ✓ Le fonctionnement de la station (suppresseurs, centrifugeuse, compresseur, agitateurs, pompes...);
- ✓ Le fonctionnement du matériel du laboratoire ;
- ✓ L'éclairage.

Le suivi de la consommation électrique journalière entre le 04/03/10 et le 07/04/10 est représenté sur le graphe suivant.

consommation de l'électricité en KW



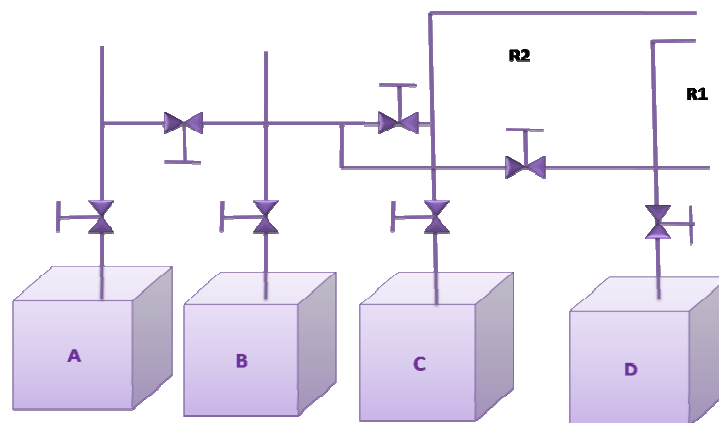
Graphe III-3 : Consommation électrique journalière entre le 04/03/10 et le 07/04/10

Nous déduisons d'après ce graphe, les valeurs suivantes :

- Consommation électrique journalière minimale = 1563 KW
- Consommation électrique journalière maximale = 2732 KW
- Consommation électrique journalière moyenne = 1871 KW

La plus grande proportion de l'énergie dépensée dans la station d'épuration est consacrée à l'aération.

L'aération du bassin d'homogénéisation et des deux réacteurs biologiques est assurée par 4 suppressesurs. Les suppressesurs A et B fonctionnent à 100% (fréquence de 50 Hz), alors que les suppressesurs C et D sont munis des variateurs de fréquence et ils fonctionnent à 80% (fréquence de 40 Hz).



Signalons qu'une aération excessive implique un taux d'O₂ élevé dans les réacteurs biologiques. Ceci a pour conséquence le développement de micro-organismes inutiles pour le traitement en plus



d'une perte d'électricité. Pour un bon fonctionnement du traitement biologique, le taux d'O₂ doit être compris entre 2 et 5 mg/l.

L'optimisation de l'électricité pourra être réalisée au niveau des supprimeurs.

2.2- Optimisation :

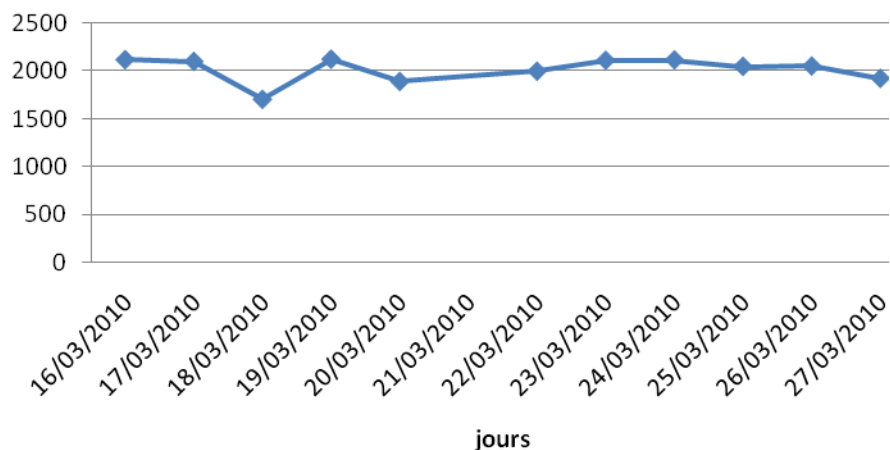
Pour la recherche d'une solution optimale, on va se baser sur 2 périodes différentes :

1^{ère} période : 16/03/10 → 28/03/10 :

- ✓ Le supprimeur A assure l'aération de bassin d'homogénéisation ;
- ✓ Le supprimeur C assure l'aération du réacteur biologique n°1 ;
- ✓ Le supprimeur D assure l'aération du réacteur biologique n°2.

Pour cette période, la consommation électrique journalière moyenne est de 2016 KW (graphe III-4).

consommation de l'électricité en KW



Graphe III-4 : Consommation électrique journalière durant la 1^{ère} période

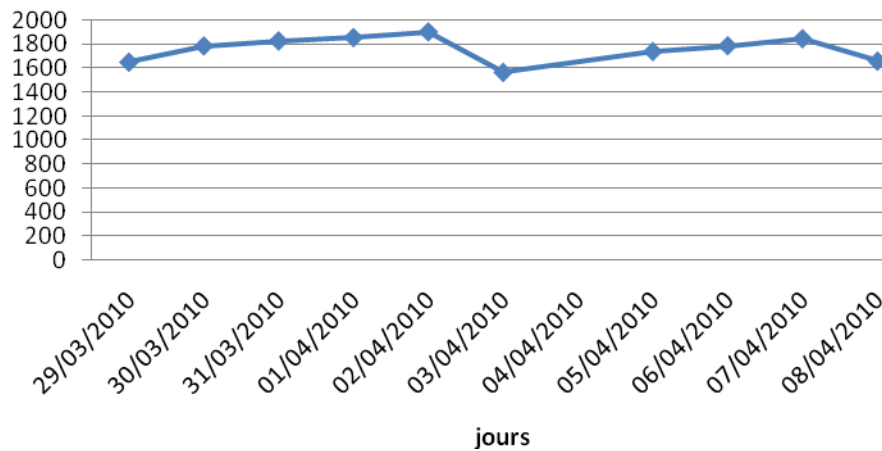
2^{ème} période : 29/03/10 → 08/04/10 :

- ✓ Le supprimeur A assure l'aération de bassin d'homogénéisation ;
- ✓ Le supprimeur B assure l'aération des deux réacteurs biologiques.

Pour cette période, la consommation électrique journalière moyenne est de 1761 KW (graphe III-5).
Le taux d'O₂ dans les réacteurs biologiques reste cependant supérieur à 5 mg/l.



consommation de l'électricité en KW



Graphe III-5 : Consommation électrique journalière durant la 2^{ème} période

On remarque après comparaison des résultats des deux périodes une diminution de la consommation électrique de l'ordre de 12,7%.

Suite à ce suivi et dans le but de réaliser une bonne optimisation, nous citons les propositions suivantes :

- ✓ Proposition n°1 : assurer l'aération des deux réacteurs biologiques par le suppresseur C ou le suppresseur D.

En appliquant cette proposition, on remarque au début une différence supérieure à 2 mg d'O₂/l entre les deux réacteurs biologiques (les deux sondes d'oxygène devraient afficher presque le même taux d'O₂/l). Ensuite, le taux d'oxygène chute à 0 mg d'O₂/l dans un réacteur.

On ne peut donc pas garder cette proposition.

- ✓ Proposition n°2 : assurer l'aération des deux réacteurs biologiques par les deux suppresseurs C et D en diminuant leur fréquence (fréquence < 25 Hz).

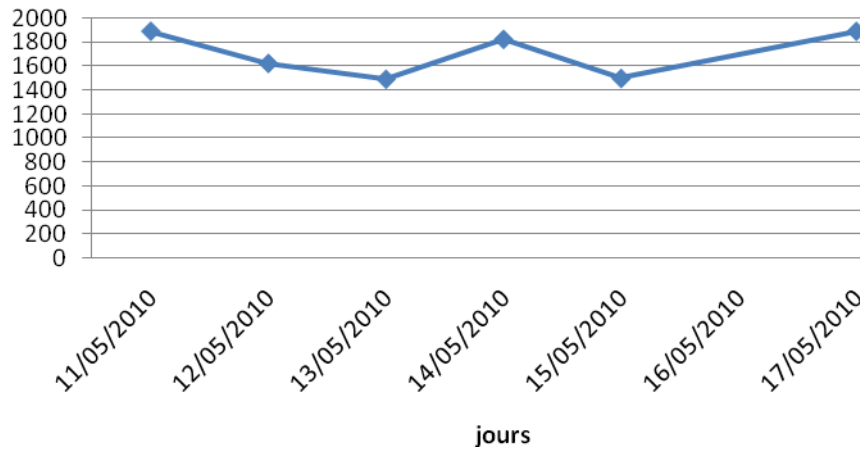
Par peur d'endommager les deux suppresseurs, les responsables au niveau de la société n'ont pas permis le test de cette proposition.

- ✓ Proposition n°3 : assurer l'aération du bassin d'homogénéisation et du réacteur biologique n°1 par le suppresseur A et l'aération du réacteur biologique n°2 par le suppresseur C.

Suite à cette proposition, la consommation journalière moyenne est de 1702 KW comme on le voit sur le graphe suivant.



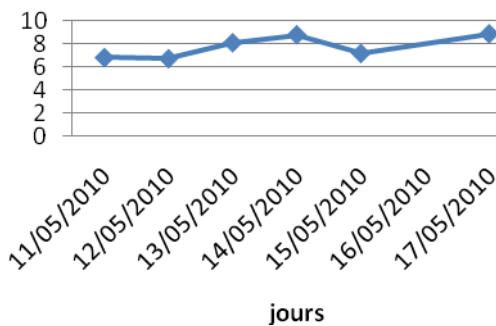
consommation de l'électricité en KW



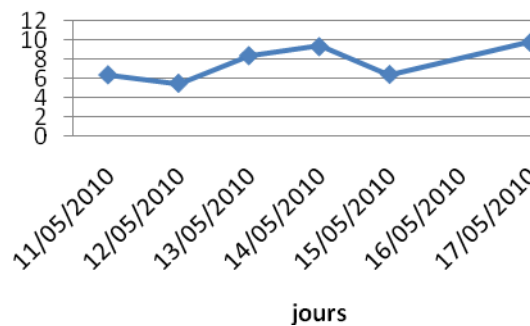
Graphes III-6 : Consommation électrique journalière après l'application de la 3^{ème} proposition

On remarque aussi que le taux d'oxygène dans les deux réacteurs biologiques est suffisant (graphes III-7 et III-8).

taux d'O₂ en mg/l



taux d'O₂ en mg/l



Graphes III-7 et 8 : Taux d'O₂ dans les réacteurs biologiques 1 et 2 après l'application de la 3^{ème} proposition

2.3- Conclusion :

Suite à ces trois propositions, on retiendra la troisième car elle n'aura pas des conséquences sur les équipements ou sur le fonctionnement de la station et elle permettra d'économiser l'énergie électrique.

3- Optimisation des produits chimiques :

3.1- Acide sulfurique :

a) Utilisation :

L'acide sulfurique est injecté automatique dans :



- Le bassin de répartition pour assurer un pH optimal pour le développement des micro-organismes favorables à la dégradation des effluents ($6,5 < \text{pH} < 8$) ;
- Le bassin de désinfection pour respecter les normes de rejets de Coca Cola ($6,5 < \text{pH} < 8$).

b) Optimisation :

Une proposition possible pour son optimisation: réduire le domaine de son injection dans les deux bassins de répartition et de désinfection entre 7,5 et 8.

Condition : mise en place d'un programme de maintenance préventive des sondes de pH et des pompes d'injection.

1.2- Urée, phosphate d'ammonium et flocculant DKFLOC :

a) Utilisation :

L'urée et le phosphate d'ammonium injectés dans le bassin de répartition, assurent l'apport de l'azote et du phosphore utilisés comme nutriments pour les micro-organismes présents dans les réacteurs biologiques.

Le flocculant DKFLOC est injecté dans le bassin de floculation dans le but de rassembler les floccs en macro-floccs et par la suite faciliter l'opération de clarification.

Dans le but d'optimiser la consommation de ces trois produits, nous avons choisi comme outil la méthodologie des plans d'expériences. Durant la période d'étude, l'efficacité de la STEP sera suivie via les valeurs de la DCO et les MES.

b) Rappel sur les plans d'expériences :

L'expérience est l'une des façons de construire le savoir. De tout temps, elle a permis à l'homme de progresser et de répondre à des questions qu'il se posait.

L'essentiel des décisions industrielles s'appuient sur les résultats d'essais et autres données issues de la production. A ce titre, l'expérimentation joue un rôle fondamental.

Que ce soit en recherche, en conception ou en production, on est conduit à faire des expériences pour rechercher l'influence de tel ou tel facteur sur les performances d'un produit ou l'obtention d'un résultat.

L'expérimentateur est toujours confronté au problème difficile de l'organisation optimale de ses essais. Comment obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ?

Or, toutes les fois que l'on peut contrôler des paramètres et mesurer une sortie, il existe une démarche permettant d'optimiser la campagne d'essais à faire pour établir la relation « cause-effet ». C'est la méthodologie des plans d'expériences.

- *Qu'est ce qu'un plan d'expériences (PE) ?*



Un plan d'expériences est une suite d'essais organisée à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais, et avec un maximum de précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses.

Définition : selon la norme ISO 3534-3

« Les Plans d'expériences constituent essentiellement une planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique ».

- **À quoi servent les plans d'expériences ?**

L'information recueillie pendant les expériences permet, d'une part, de repérer les facteurs expérimentaux significativement (au sens statistique) influents parmi l'ensemble de ceux qui ont été pris en compte dans l'étude ; d'autre part, de construire des modèles de régression ou d'analyse de la variance de bonne qualité dans un but de compréhension et/ou de prédiction et/ou de recherche d'optimum.

- **Historique :**

Les méthodes rigoureuses d'expérimentation, basées sur l'utilisation des plans d'expérience, sont dues aux travaux de Sir Ronald Fisher (1890-1962). Ce brillant mathématicien, très productif dans le domaine de la Statistique, a été amené à s'intéresser aux techniques d'expérimentation suite à son emploi, en 1919, à la "Rothamsted Experimental Station", centre de recherche agronomique situé au nord de Londres. Il cherche alors à augmenter les rendements agricoles en combinant divers types d'engrais, de variétés végétales, de méthodes de cultures, de types de sols, etc... Face à l'impossibilité de réaliser la totalité des expériences ceci l'amène à proposer des configurations expérimentales basées sur des modèles statistiques rigoureux. Ceci constitue le point de départ de la méthode théorique des plans d'expérience.

Divers chercheurs ont par la suite marché dans les traces de Fisher afin de promouvoir et développer l'utilisation des techniques de planification expérimentales dans d'autres domaines que l'agronomie. Dès les années 50 les travaux de Box et de ses collaborateurs (principalement sur les surfaces de réponse) ont entraîné un bon nombre d'applications pratiques. Mais ce sont certainement les travaux de G. Taguchi qui ont permis une vaste diffusion des plans d'expérience, notamment dans le milieu industriel. Travaillant, entre autre, comme consultant pour de multiples entreprises japonaises G. Taguchi a eu l'idée de réaliser des tables de configurations expérimentales de référence facilement utilisables par des non-spécialistes.

Depuis 1988, l'utilisation des plans d'expériences s'est considérablement développée dans les mondes industriels et universitaires. De nombreux logiciels consacrés aux plans d'expériences sont apparus. Ils ont simplifié la construction des plans, effacé les difficultés de calcul et permis la réalisation rapide de graphiques mettant en valeur les principaux résultats de l'expérimentation.

Les principes des plans d'expériences se sont développés dans diverses branches de la recherche industrielle, en particulier en chimie avec les plans de surfaces de réponse du second degré, et les plans de mélange.

- **Avantages :**



Les principaux avantages de cette méthode par rapport à la méthode traditionnelle d'expérimentation sont :

- ✓ La possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs avec un nombre d'essais réduits ;
- ✓ L'organisation et l'estimation de la durée et du coût des essais (à l'aide de la planification) ;
- ✓ La quantification des effets des facteurs ;
- ✓ La détection des éventuelles interactions entre facteurs et leurs effets sur la réponse ;
- ✓ La modélisation mathématique très aisée du système étudié ;
- ✓ La prévision des réponses de manière satisfaisante sur l'ensemble du domaine expérimental ;
- ✓ La détermination des résultats avec une bonne précision ;
- ✓ L'obtention d'une (ou de plusieurs) solution optimale.

• **Outil informatique :**

L'outil informatique est nécessaire à la réalisation rapide et précise d'une étude menée à l'aide d'un plan d'expérience.

Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences (plan classique, plans optimaux, etc.) et les calculs nécessaires à leur interprétation (recherche des estimateurs, tests d'hypothèses, etc.) sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques (droites d'Henry, diagrammes de Pareto, représentations graphiques des surfaces de réponses, etc.) qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

c) Optimisation :

La stratégie de travail qu'on a suivi est composée de plusieurs étapes:

❖ **Etape 1 : Définition de l'objectif de l'étude :**

L'objectif de cette étude est :

1. De connaître l'intensité de l'effet de l'urée, du phosphate d'ammonium et du flocculant DKFLOC sur deux parmi les principaux indicateurs mesurant les performances épuratoires d'une STEP, à savoir la MES(S) et le Rendement(DCO);
2. D'optimiser ces trois produits tout en respectant les deux critères suivants : $MES(S) < 25$ mg/l et Rendement(DCO) $> 90\%$.

❖ **Etape 2 : Description des facteurs sur lesquels va porter l'expérimentation :**

Les trois facteurs contrôlables de cette étude sont :

1. La quantité de l'urée ;
2. La quantité de phosphate d'ammonium ;
3. La quantité du flocculant DKFLOC.



Les deux solutions de l'urée et du phosphate d'ammonium, d'une concentration de 50 g/l, sont préparées puis stockées dans deux bacs agités de 500 litres. Leur injection se fait à l'aide de deux pompes doseuses.

La préparation de la solution du flocculant DKFLOC est faite automatiquement à l'aide d'une unité de préparation des polymères. Avec un débit d'eau de 800 l/h, cette solution a une concentration de l'environ de 2,025 g/l. L'injection de la solution du flocculant se fait à l'aide d'une pompe doseuse.

❖ Etape 3 : Choix de la réponse permettant d'atteindre l'objectif :

Comme réponses, j'ai proposé d'étudier les trois principales normes de rejet de la station : les MES (S), le Rendement (DCO) et la DBO₅ (S). Mais le manque de flacons suffisants pour le lancement de la DBO₅ au laboratoire de la STEP, m'a limité l'étude à deux réponses : c'est les MES (S) et le Rendement (DCO).

Les matières en suspension (MES) : terme employé pour désigner l'ensemble des matières minérales ou organiques non dissoutes présentes dans un liquide. L'objectif est d'obtenir à la sortie une quantité inférieure à 25 mg/l.

La demande chimique en oxygène (DCO) : critère de pollution représentatif de la majeure partie des composés organiques ainsi que des sels minéraux oxydables. On vise avoir au moins un rendement de 90%.

❖ Etape 4 : Recherche des facteurs de bruit qui pourraient être influents sur la réponse :

L'oubli d'un facteur important peut échouer le plan. Alors, puisque le débit de l'eau à traiter (réglé à l'entrée du bassin de répartition) influence beaucoup sur la qualité de l'épuration, on a essayé de garder un débit constant de 12 m³/h durant toute la période d'étude.

Afin de regrouper les autres facteurs susceptibles d'avoir une influence sur les deux réponses et sur la qualité d'épuration, j'ai établi les trois diagrammes cause-effet suivants :

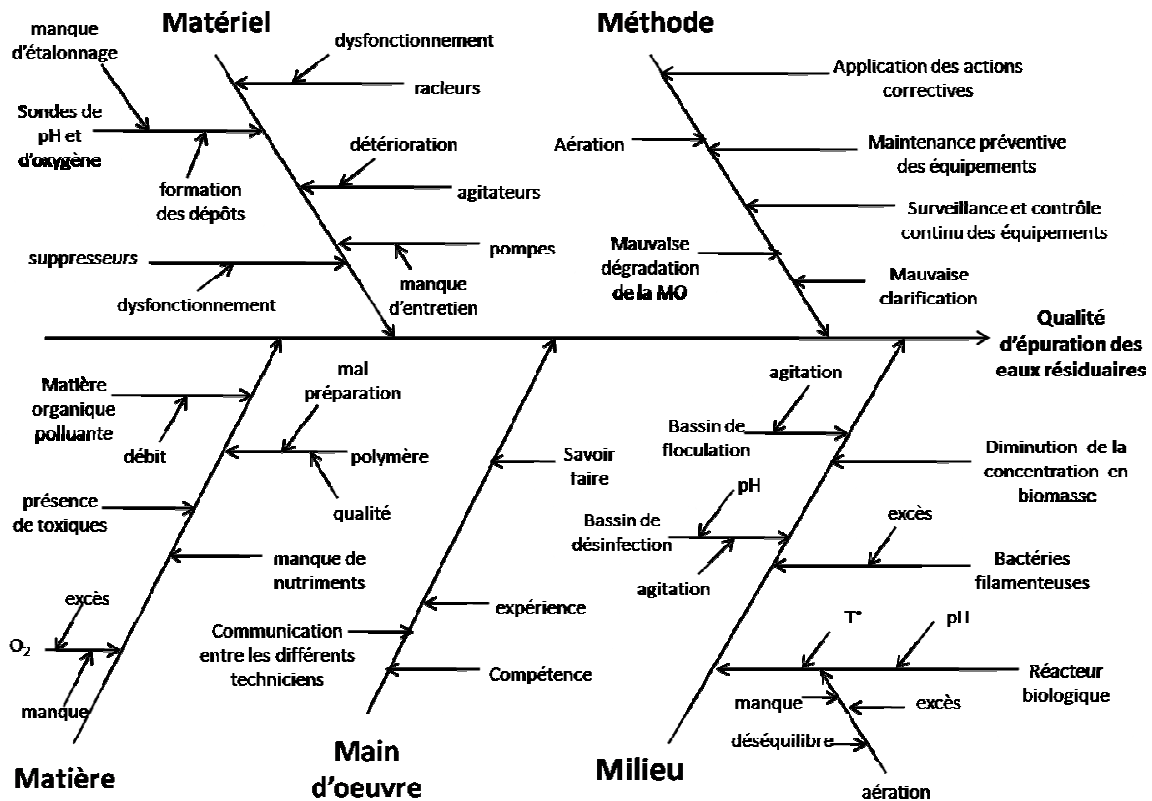


Figure III-1 : Diagramme d'Ishikawa pour la qualité d'épuration des eaux résiduaires

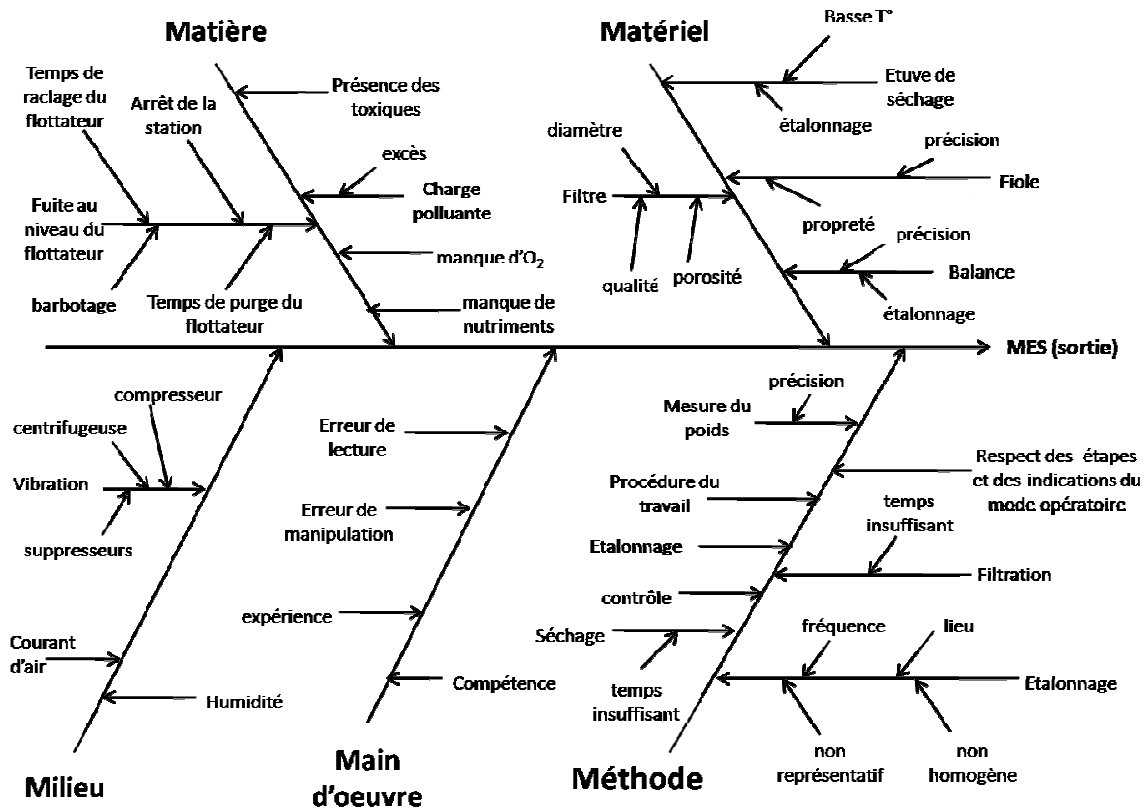


Figure III-2 : Diagramme d'Ishikawa pour la réponse MES(S)

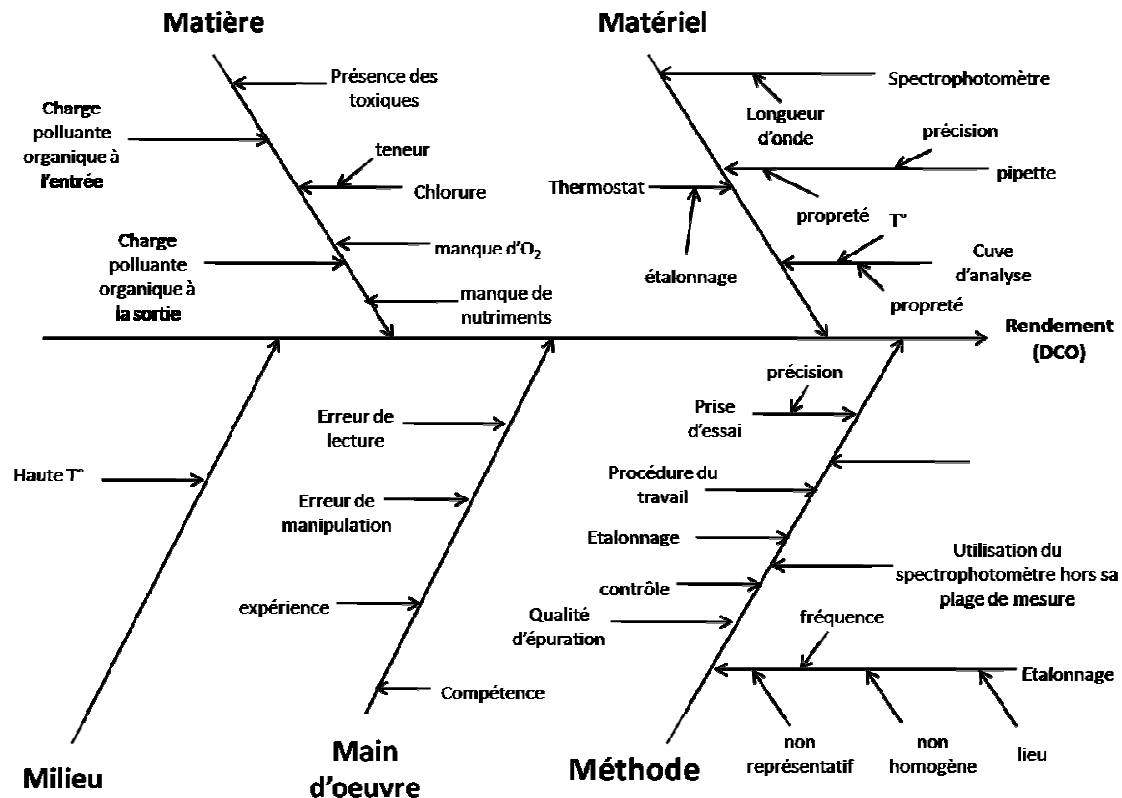


Figure III-3 : Diagramme d'Ishikawa pour la réponse Rendement(DCO)

❖ Etape 5 : Postulation des hypothèses :

Cette étude est basée sur les deux hypothèses suivantes :

- 1) Les trois facteurs étudiés sont parfaitement contrôlables.
- 2) Les effets des facteurs de « bruit » sur les deux réponses sont négligeables par rapport aux effets des trois facteurs étudiés.

❖ Etape 6 : Description des contraintes :

Les contraintes techniques liées aux facteurs étudiés :

- Les pompes utilisées pour l'injection des trois produits chimiques ne peuvent pas fonctionner au delà de :

- 14,7 l/h pour l'urée et le phosphate d'ammonium ;
- 65,6 l/h pour le floculant.

- La pompe de l'injection du floculant est fixée à son débit maximal. Alors, pour varier la quantité du polymère injectée on doit de faire varier la concentration de la solution préparée. Lors de la préparation du floculant, la quantité du floculant solide injecté par unité de temps est fixe (programme automatique). Alors, afin de faire varier la quantité du polymère injectée on a procédé à la variation du débit de l'eau utilisé pendant la préparation.



La contrainte liée à la mesure de la demande chimique en oxygène : la plage de mesure de la méthode utilisée est 100-2000 mg O₂/l.

❖ **Etape 7 : Définition du domaine expérimental (niveaux des facteurs) :**

Définition des niveaux des facteurs :

Il s'agit de choisir les niveaux haut et bas de chaque facteur.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur.

Codage des facteurs :

Afin de ramener chacun des facteurs à un même intervalle, de supprimer leurs unités, de permettre leur comparaison et enfin de simplifier l'analyse mathématique on va les coder. Le niveau bas du facteur est noté -1 et le niveau haut +1.

Le domaine expérimental d'intérêt est fixé selon les intervalles de variation préalablement définis pour chaque facteur.

Les domaines de variations des facteurs étudiés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III-2 : Domaines de variations des trois facteurs étudiés

Variable	Facteur	Unité	Centre	Pas de variation
x ₁	débit de l'urée	L/h	0,5	0,3
x ₂	débit du phosphate d'ammonium	L/h	0,5	0,3
x ₃	débit de l'eau de préparation du floculant	L/h	800	100

❖ **Etape 8 : Postulation d'un modèle :**

On recherche une relation de cause à effet entre les trois facteurs (qui sont supposés influencer les performances de l'épuration) et les réponses (qui caractérisent les performances de l'épuration).

La planification d'expérience consiste à imposer aux facteurs des variations particulières, à mesurer les variations induites des réponses et à en déduire les relations entre facteurs et réponses.

La modélisation d'un phénomène étudié permet de connaître en n'importe quel point du domaine expérimental la valeur d'une ou plusieurs réponses expérimentales.

Afin d'atteindre mon objectif (optimiser les trois produits chimiques tout en respectant les réponses retenues), j'ai choisi un modèle polynômial du 2nd degré avec interactions d'ordre 2:

$$y_1 = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3.$$

$$y_2 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3.$$

Avec:

y₁ : la 1^{ère} réponse : MES (S) ;

y₂ : la 2^{ème} réponse : Rendement (DCO) ;

x₁ : le niveau du 1^{er} facteur sous forme codée ;

x₂ : le niveau du 2^{ème} facteur sous forme codée ;

x₃ : le niveau du 3^{ème} facteur sous forme codée ;



a_1, b_1 : l'effet du 1^{er} facteur sur la 1^{ère} et la 2^{ème} réponse ;

a_2, b_2 : l'effet du 2^{ème} facteur sur la 1^{ère} et la 2^{ème} réponse ;

a_3, b_3 : l'effet du 3^{ème} facteur sur la 1^{ère} et la 2^{ème} réponse ;

$a_{ij}, a_{ij}, b_{ii}, b_{ij}$: représentent respectivement les effets des facteurs et de leurs interactions d'ordre 2 sur la 1^{ère} et la 2^{ème} réponse.

❖ Etape 9 : Déduction d'un plan d'expériences :

Après avoir examiné les contraintes en détail, on a retenu comme plan celui de Box-Behnken car il :

- permet d'établir le modèle désiré ;
- ne nécessite qu'un nombre restreint d'essais ;
- permet un réglage facile des niveaux des facteurs (tous les facteurs ont trois niveaux : -1, 0 et +1).

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube. On place les points expérimentaux au milieu des arêtes et au centre du cube. Cette disposition a pour conséquence de répartir tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude, donc sur une sphère. On ajoute des points au centre du domaine d'étude.

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est illustré par la figure suivante.

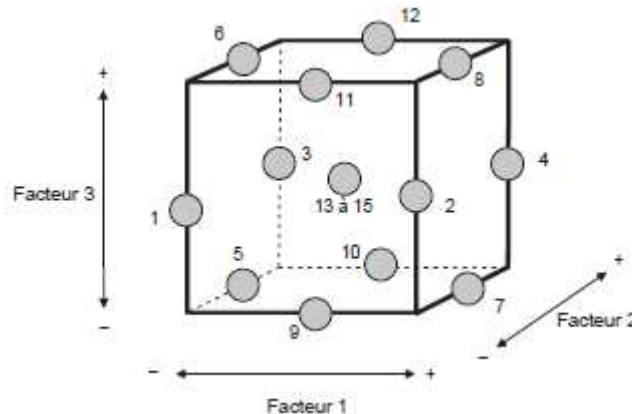


Figure III-4 : Plan de Box-Behnken pour trois facteurs.

Le plan d'expériences exige 13 essais. Afin de tester la validité du modèle mathématique postulé, on a ajouté 2 essais au centre du domaine expérimental, ce qui augmente le nombre d'expériences à 15.

Le plan d'expériences obtenu est le suivant :

Tableau III-3 : Plan d'expériences

N° Exp	X1	X2	X3
1	-1.0000	-1.0000	0.0000
2	1.0000	-1.0000	0.0000
3	-1.0000	1.0000	0.0000
4	1.0000	1.0000	0.0000
5	-1.0000	0.0000	-1.0000
6	1.0000	0.0000	-1.0000



7	-1.0000	0.0000	1.0000
8	1.0000	0.0000	1.0000
9	0.0000	-1.0000	-1.0000
10	0.0000	1.0000	-1.0000
11	0.0000	-1.0000	1.0000
12	0.0000	1.0000	1.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000

❖ **Etape 10 : Génération du plan d'expérimentation :**

Avec les grandeurs réelles, le plan d'expériences prend le nom du plan d'expérimentation, de matrice d'expérimentation, de protocole expérimental ou du tableau d'expérimentation. Ce tableau est très utile pour l'exécution des essais.

Randomisation :

Dans le cadre de l'étude en cours, le changement des niveaux des différents facteurs ne présente pas des difficultés. Alors, afin de rendre toute erreur systématique probable (due aux fluctuations des facteurs non contrôlés et aux phénomènes de dérive) une erreur aléatoire, on a procédé à une randomisation (réalisation des essais dans un ordre aléatoire).

Le plan d'expérimentation est représenté dans le tableau suivant :

Tableau III-4 : Plan d'expérimentation

N° Exp	Rand	Urée l/h	Phosphate d'ammonium l/h	Eau préparation floculant l/h
1	15	0.2	0.2	800
2	4	0.8	0.2	800
3	2	0.2	0.8	800
4	11	0.8	0.8	800
5	5	0.2	0.5	700
6	9	0.8	0.5	700
7	8	0.2	0.5	900
8	14	0.8	0.5	900
9	3	0.5	0.2	700
10	12	0.5	0.8	700
11	10	0.5	0.2	900
12	6	0.5	0.8	900
13	1	0.5	0.5	800
14	13	0.5	0.5	800
15	7	0.5	0.5	800

❖ **Etape 11 : Réalisation des expériences :**

C'est la partie technique de l'étude. Il faut que les essais soient menés avec beaucoup de soin et il faut être sûr de la qualité des résultats.



Les échantillons de l'entrée ont été prélevés à l'entrée du tamis fin. Ceux de la sortie ont été prélevés à la sortie du flottateur.

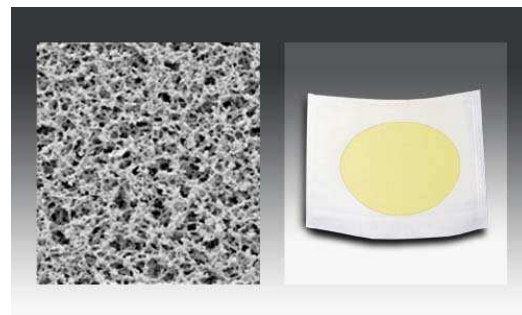
Pour la détermination des paramètres physico-chimiques, les échantillons prélevés dans des béchers ont été immédiatement transférés au laboratoire pour analyse.

Les MES ont été quantifiées par filtration (filtres en nitrate de cellulose, circulaires de 47 mm de diamètre et de porosité 0,45 μm). La mesure des poids des filtres avant et après filtration se fait à l'aide d'une balance analytique OHAUS PioneerTM d'une capacité maximale de 210 g.

La DCO a été déterminée par la méthode colorimétrique avec un spectrophotomètre HACH LANGE DR 2800 à une longueur d'onde $\lambda = 605 \text{ nm}$.



Balance analytique OHAUS PioneerTM



Filtre en nitrate de cellulose



Spectrophotomètre HACH LANGE DR 2800



Thermostat HACH LANGE LT 200

Le tableau suivant regroupe le plan d'expérimentation et les résultats obtenus après la réalisation de tous les essais.

Tableau III-5 : Plan d'expérimentation et résultats obtenus

N° Exp	Rand	urée	Phosphate d'ammoniu m	Eau préparation floculant	MES	Rendement (DCO)
		l/h	l/h	l/h	mg/l	
1	15	0.20	0.20	800	24	94.31
2	4	0.80	0.20	800	32	90.41
3	2	0.20	0.80	800	32	93.64
4	11	0.80	0.80	800	4	96.60
5	5	0.20	0.50	700	24	94.61
6	9	0.80	0.50	700	16	96.05
7	8	0.20	0.50	900	4	96.91
8	14	0.80	0.50	900	8	95.28
9	3	0.50	0.20	700	24	92.79
10	12	0.50	0.80	700	12	96.50
11	10	0.50	0.20	900	32	93.49
12	6	0.50	0.80	900	32	95.97



13	1	0.50	0.50	800	24	95.60
14	13	0.50	0.50	800	16	97.09
15	7	0.50	0.50	800	16	96.40

Les modes opératoires et le calcul des réponses sont présentés dans l'annexe.

❖ Etape 12 : Traitement des données par un logiciel adéquat :

Pour calculer les coefficients du modèle, et estimer leurs variances, avec la meilleure précision possible, tout en gagnant du temps, l'outil informatique est nécessaire.

Toute l'analyse présentée dans cette partie a été menée à l'aide du logiciel Nemrod.

Nemrod est un logiciel en langue française, il est exclusivement dédié à la construction et l'analyse des plans d'expériences.

Comme tout logiciel très spécialisé, il présente l'avantage d'être rapidement utilisable pour traiter une étude menée à l'aide d'un plan d'expérience et très convivial (quelques "clics" de souris suffisent). Ses points forts sont, de plus, les plans d'expérience pour mélanges ainsi que les sorties graphiques très claires (2D et 3D simultanées).

❖ Etape 13 : Interprétation de la validité du modèle postulé et de la significativité des coefficients :

Le traitement des résultats s'effectue à l'aide de la régression linéaire multiple et l'analyse de la variance.

i. Réponse n° 1 :

Analyse de la variance :

L'analyse statistique du modèle conduit dans un premier temps à la table d'analyse de la variance suivante :

Tableau III-6 : Analyse de la variance pour la réponse MES

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signification %
Régression	9.33333E+0002	9	1.03703E+0002	1.0924	48.7
Résidus	4.74667E+0002	5	9.49333E+0001		
Validité	4.32000E+0002	3	1.44000E+0002	6.7500	13.2
Erreur	4.26667E+0001	2	2.13333E+0001		
Total	1.40800E+0003	14			

Tester la validité du modèle mathématique postulé revient à réaliser deux tests statistiques d'analyse de la variance: ANOVA 1 et ANOVA 2.



Pour savoir si le modèle est globalement explicatif sur l'ensemble du domaine d'étude il faut vérifier le test ANOVA 1.

ANOVA 1 < 5% : Modèle globalement explicatif au seuil de 5%.

De plus il faut tester l'ANOVA 2 pour voir s'il n'y a pas de défaut d'ajustement concernant le modèle.

ANOVA 2 > 5% : Pas de défaut d'ajustement au seuil de 5%.

D'après les résultats de l'analyse de la variance, le modèle est non explicatif puisque l'ANOVA 1 est supérieur à la 5%. Donc, le modèle n'est pas valide.

Estimations et statistiques des coefficients :

Le coefficient de régression R2 et le coefficient de régression ajusté R2A mesurent la quantité de la variation autour de la moyenne expliquée par le modèle et indiquent la qualité de l'ajustement du modèle aux valeurs expérimentales.

Tableau III-7 : Coefficients de régression R2 et R2A

Ecart Type de la réponse	9.7
R2	0.663
R2A	0.056

La valeur du coefficient de régression (0.663) et celle du coefficient de régression ajusté (0.056) sont trop faibles pour rendre compte d'un ajustement correct. Ce qui confirme le résultat trouvé par l'analyse de la variance.

On retrouve ce même résultat en considérant le tableau des divers paramètres estimés (Tableau III-8) qui montre que, à l'exception de l'effet moyen général b0, tous les paramètres estimés pour ce modèle ne sont pas significativement différents de zéro. Ce qui explique que l'ajustement réalisé n'est pas satisfaisant.

Tableau III-8 : Estimations et statistiques des coefficients

Nom	Coefficient	t.exp.	Signif. %
b0	18.7	3.32	2.13 *
b1	-3.0	-0.87	42.7
b2	-4.0	-1.16	29.9
b3	0.0	0.00	100.0
b11	-3.8	-0.76	48.8
b22	8.2	1.61	16.7



b33	-1.8	-0.36	73.0
b12	-9.0	-1.85	12.2
b13	3.0	0.62	56.9
b23	3.0	0.62	56.9

N.B. : les notations « * », « ** » et « *** » ont les significations suivantes :

*** : confiance > 99.9%

** : confiance > 99.0%

* : confiance > 95.0%

Etude des résidus de la réponse :

a) Tableau des résidus :

Le tableau des résidus (donné ci-dessous) permet de juger de manière plus précise, c'est-à-dire expérience par expérience, de la qualité de l'ajustement réalisé.

La comparaison entre les "Yexp" (réponses mesurées) et "Ycalc" (réponses prédites par le modèle) montre qu'il y'a un problème d'ajustement.

Tableau III-9 : Tableau des résidus

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence
1	24.0	21.0	3.0
2	32.0	33.0	-1.0
3	32.0	31.0	1.0
4	4.0	7.0	-3.0
5	24.0	19.0	5.0
6	16.0	7.0	9.0
7	4.0	13.0	-9.0
8	8.0	13.0	-5.0
9	24.0	32.0	-8.0
10	12.0	18.0	-6.0
11	32.0	26.0	6.0
12	32.0	24.0	8.0
13	24.0	18.7	5.3
14	16.0	18.7	-2.7
15	16.0	18.7	-2.7

Les différents résidus peuvent une nouvelle fois être représentés sous forme graphique.

b) Etude graphique des résidus :

Les problèmes d'ajustement de ce modèle peuvent être cernés plus précisément à l'aide du nuage des résidus. Ce nuage de points (donné ci-dessous) représente, pour chacune des expériences réalisées, l'erreur d'ajustement commise (Ycalc - Yexp).

On remarque une répartition non homogène des points de part et d'autre de l'axe des abscisses. Cette non homogénéité peut être due à un problème rencontré lors de la mesure.

La distribution des résidus autour de la droite d'Henry semble bonne.

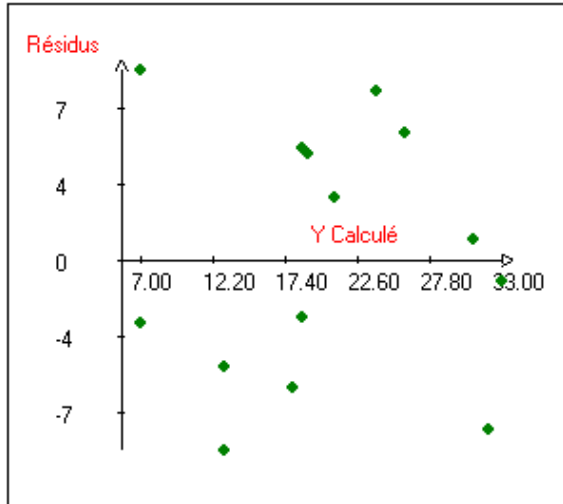


Figure III-5 : Résidus = F(Ycalc)

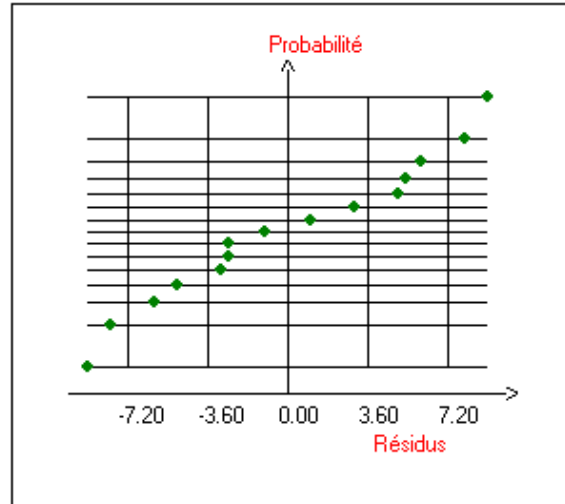


Figure III-6 : Droite d'Henry

✚ Incertitude expérimentale sur la mesure des MES :

Définition : le coefficient de variation (CV) :

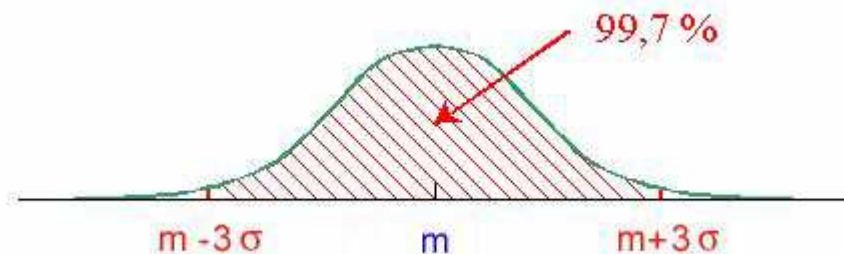
Le coefficient de variation est une grandeur sans dimension représentant la dispersion relative. Ce coefficient est utilisé dans le calcul d'incertitude.

$$CV = \frac{s}{y} \times 100$$

Avec : s = écart-type sur le résultat expérimental de y.

On estime l'écart-type en faisant référence à un modèle gaussien des incertitudes de mesure :

$$s = \frac{m}{3} \quad (\text{selon Gauss à } 99,7\%).$$





Formules de calcul :

Les formules suivantes sont très commodes dans les calculs d'incertitudes pour des variables évaluées par des opérations algébriques simples sur des variables quantitatives (multiplication par un scalaire, multiplication, division).

$$CV(k \cdot X) = CV(X)$$

$$CV^2(X \cdot Y) = CV^2(X) + CV^2(Y)$$

$$CV^2(X/Y) = CV^2(X) + CV^2(Y)$$

Avec k est une constante ; X et Y sont deux variables aléatoires quantitatives.

Calcul de l'incertitude expérimentale sur la MES :

Dans la mesure des MES, on obtient le résultat final à partir de la formule suivante :

$$MES = \frac{m_2 - m_1}{V} \times 10^6$$

Où : m_1 représente le poids du filtre sec avant filtration (g) ;

m_2 représente le poids du filtre sec après filtration (g) ;

$(m_2 - m_1)$ représente le poids de la MES contenu dans un échantillon de 25 ml ;

$V = 25$ ml représente le volume de la prise d'essai (ml).

La balance utilisée permet d'apprécier $\pm 0,0001$ g.

Le volume de la prise d'essai est donné à $\pm 0,04$ ml.

En se reposant sur l'hypothèse d'un modèle gaussien, on traduit les incertitudes en écart-types :

$$s(m_1) = s(m_2) = \frac{0,0001}{3} \quad \text{et} \quad s(V) = \frac{0,04}{3}$$

La division par 3 provient du fait que $\pm 0,0001$ et $\pm 0,04$ sont des intervalles de confiance à 99,7%.

En appliquant la 1^{ère} et la 3^{ème} formule de calcul, on obtient :

$$CV^2(MES) = CV^2(m_2 - m_1) + CV^2(V)$$

$$CV^2(m_2 - m_1) = \frac{s^2(m_2 - m_1)}{(m_2 - m_1)^2}$$

$$\left[\frac{s(MES)}{MES} \right]^2 = \left[\frac{s(m_2)}{m_2 - m_1} \right]^2 + \left[\frac{s(m_1)}{m_2 - m_1} \right]^2 + \left[\frac{s(V)}{V} \right]^2$$

Pour la valeur cible de 25 mg/l, on a :

$$m_2 - m_1 = \frac{MES \times V}{10^6} = \frac{25 \times 25}{10^6} = 0,000625 \text{ g}$$

Alors,

$$s^2(MES) = 2 \times \left[\frac{MES \times s(m_2)}{m_2 - m_1} \right]^2 + \left[\frac{MES \times s(V)}{V} \right]^2$$

$$s^2(MES) = 2 \times \left[\frac{25 \times 0,0001}{3 \times 0,000625} \right]^2 + \left[\frac{25 \times 0,04}{3 \times 25} \right]^2$$

$$s^2(MES) = 3,55555 + 0,00018$$

99,995% 0,005%

$$\rightarrow s(MES) \approx 1,89 \text{ mg/l}$$

D'après ce calcul, on voit bien que source principale de dispersion est le poids du filtre.



Le matériel utilisé permet d'encadrer la valeur cible de la MES (25 mg/l) avec un intervalle de confiance à 99,7% : $\pm 3 \times 1,89 = 5,67$ mg/l.

→ MES = 25 ± 5 mg/l.

On voit bien que l'ordre de grandeur de l'incertitude est important par rapport à la valeur cible.

En plus, la mesure du bruit au niveau du laboratoire a donné comme résultat : un niveau sonore continu de 92,3 dB (décibel : unité de mesure de l'intensité du son) → obligation de port des protecteurs auditifs.

Les principales sources de bruit au niveau de la STEP sont : les supprimeurs, le compresseur et la centrifugeuse.

La précision de la balance analytique est influencée par le niveau du bruit, ce qui provoque des fluctuations entre les différentes mesures effectuées.

ii. Réponse n° 2 :

Analyse de la variance :

Le tableau ci-dessous résume les résultats de l'analyse de la variance donnée par le logiciel NEMRODW.

Tableau III-10 : Analyse de la variance pour la réponse Rendement (DCO)

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signification %
Régression	46.4802	9	5.1645	17.5699	0.407 **
Résidus	1.4697	5	0.2939		
Validité	0.3576	3	0.1192	0.2144	88.0
Erreur	1.1121	2	0.5560		
Total	47.9499	14			

L'analyse de l'ANOVA 1 montre clairement que la régression explique le phénomène étudié avec un degré de confiance de 99%.

De plus l'analyse de l'ANOVA 2 sur le défaut d'ajustement montre que le modèle pourrait être utilisé comme modèle prédictif.

→ Le modèle est statistiquement validé et ne présente pas de défaut d'ajustement.

Estimations et statistique des coefficients :

La régression a donné un coefficient de corrélation multiple égale à 0.969 et un coefficient de corrélation multiple ajusté égale à 0.914, ce qui montre que la réponse est fortement corrélée avec les facteurs.

Tableau III-11 : Coefficients de régression R2 et R2A

Ecart Type de la réponse	0.542
R2	0.969
R2A	0.914
R2 pred	0.828
PRESS	8.224



Nombre de degrés de liberté	5
-----------------------------	---

Les estimations et les statistiques des coefficients du modèle sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-12 : Estimations et les statistiques des coefficients

Nom	Coefficient	t.exp.	Signif. %
b0	96.363	307.85	< 0.01 ***
b1	-0.141	-0.74	49.9
b2	1.464	7.64	0.0960 ***
b3	0.213	1.11	31.9
b11	-0.799	-2.83	3.64 *
b22	-1.824	-6.47	0.177 **
b33	0.148	0.53	62.4
b12	1.715	6.33	0.192 **
b13	-0.767	-2.83	3.65 *
b23	-0.307	-1.13	30.9

Ce tableau fait apparaître l'existence de quelques coefficients non significatifs (ceux qui présentent un pourcentage élevé), à savoir b1, b3, b33 et b23.

De ce tableau, on peut aussi remarquer que le phosphate d'ammonium est le facteur le plus influent sur le rendement de la DCO.

Etude des résidus de la réponse :

a) Tableau des résidus :

D'après les résultats du tableau suivant représentant les résidus, on peut dire que l'ordre de grandeur de ces résidus est raisonnable tout en notant la présence de deux points aberrants (expériences N°13 et 14).

La plus grande erreur d'ajustement commise (de l'ordre de 0.7 pour une réponse prédite de 96,363) correspond aux deux expériences N°13 et 14 dites "centrales".

Tableau III-13 : Tableau des résidus

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence
1	94.310	94.132	0.178
2	90.410	90.420	-0.010
3	93.640	93.630	0.010
4	96.600	96.777	-0.177
5	94.610	94.874	-0.264
6	96.050	96.126	-0.076
7	96.910	96.834	0.076
8	95.280	95.016	0.264



9	92.790	92.704	0.086
10	96.500	96.246	0.254
11	93.490	93.744	-0.254
12	95.970	96.056	-0.086
13	95.600	96.363	-0.763
14	97.090	96.363	0.727
15	96.400	96.363	0.037

b) Etude graphique des résidus :

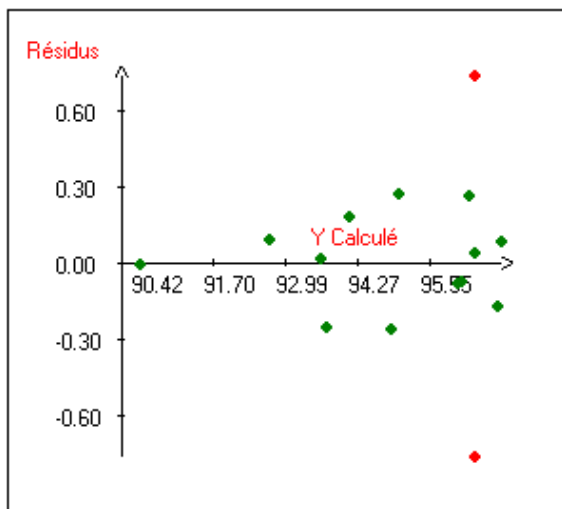


Figure III-7 : Résidus = F(Ycalc)

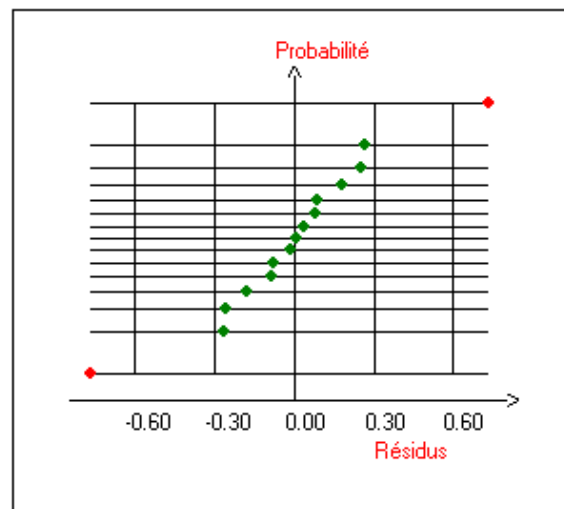


Figure III-8 : Droite d'Henry

Le graphique des résidus confirme notre hypothèse sur la présence de deux points aberrants (en rouge).

A l'exception de ces deux points, le graphe montre une répartition homogène des points de part et d'autre de l'axe des abscisses. De plus, les résidus sont alignés sur la droite d'Henry.

Dans le but d'améliorer statistiquement le modèle utilisé, on peut éliminer certaines expériences jugées aberrantes et certains coefficients ayant un effet non significatif sur la réponse.

On ne peut pas éliminer les coefficients qui présentent un facteur principal (b_1 et b_3) ainsi que les deux points aberrants (car ils servent à la validation du modèle). Pour ces raisons, on a procédé à l'élimination d'un seul coefficient qui présente une interaction d'ordre deux (b_{33}) et qui est le moins significatif (62,4%).

✚ Interprétation des résultats la validité du modèle et de la significativité des coefficients après amélioration statistique :

Analyse de la variance :



Tableau III-14 : Analyse de la variance pour la réponse Rendement (DCO) après amélioration statistique du modèle

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signification %
Régression	46.3990	8	5.7999	22.4376	0.107 **
Résidus	1.5509	6	0.2585		
Validité	0.4389	4	0.1097	0.1973	91.9
Erreur	1.1121	2	0.5560		
Total	47.9499	14			

On remarque que l'analyse de la variance s'est un petit peu améliorée après l'élimination du coefficient b33, qu'avant :

- ✓ L'ANOVA 1 a passée de 0,407 ** à 0,107 **.
- ✓ L'ANOVA 2 a passée de 88 à 91,7.

Estimations et statistiques des coefficients :

On remarque qu'après amélioration statistique du modèle, l'écart-type de la réponse a passé de 0,542 à 0,508.

Tableau III-15 : Coefficients de régression R2 et R2A

Ecart Type de la réponse	0.508
R2	0.968
R2A	0.925
R2 pred	0.869
PRESS	6.293
Nombre de degrés de liberté	6

Le tableau suivant résume les estimations et les statistiques des coefficients après amélioration statistique du modèle.

Tableau III-16 : Estimations et statistiques des coefficients

Nom	Coefficient	t.exp.	Signif. %
b0	96.455	394.92	< 0.01 ***
b1	-0.141	-0.79	46.6
b2	1.464	8.14	0.0306 ***
b3	0.213	1.18	28.2
b11	-0.811	-3.07	2.17 *
b22	-1.836	-6.96	0.0613 ***
b12	1.715	6.75	0.0705 ***
b13	-0.767	-3.02	2.32 *
b23	-0.307	-1.21	27.2

La différence la plus remarquable dans ce tableau est le passage des deux coefficients b22 et b12 d'un niveau de confiance > 99,0% à un niveau de confiance > 99,9%.



Etude des résidus de la réponse :

a) Tableau des résidus :

On remarque que l'amélioration de la qualité statistique du modèle n'a pas beaucoup influencé le résultat des résidus.

Tableau III-17 : Tableau des résidus

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence
1	94.310	94.201	0.109
2	90.410	90.488	-0.078
3	93.640	93.698	-0.058
4	96.600	96.846	-0.246
5	94.610	94.805	-0.195
6	96.050	96.058	-0.008
7	96.910	96.765	0.145
8	95.280	94.948	0.332
9	92.790	92.635	0.155
10	96.500	96.178	0.322
11	93.490	93.675	-0.185
12	95.970	95.988	-0.018
13	95.600	96.455	-0.855
14	97.090	96.455	0.635
15	96.400	96.455	-0.055

b) Etude graphique des résidus :

On remarque la même chose pour le graphique des résidus.

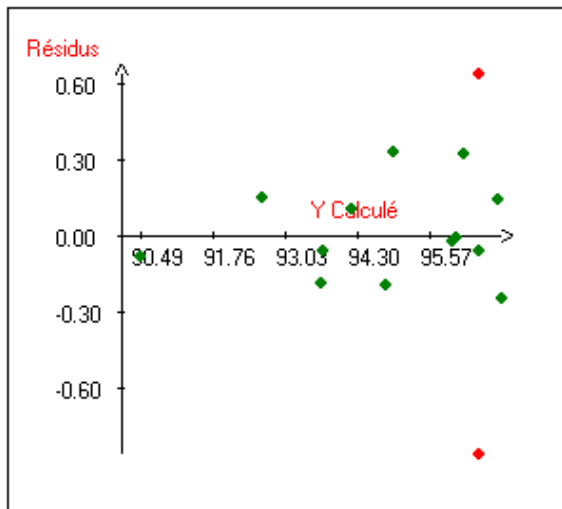


Figure III-9 : Résidus = F(Ycalc)

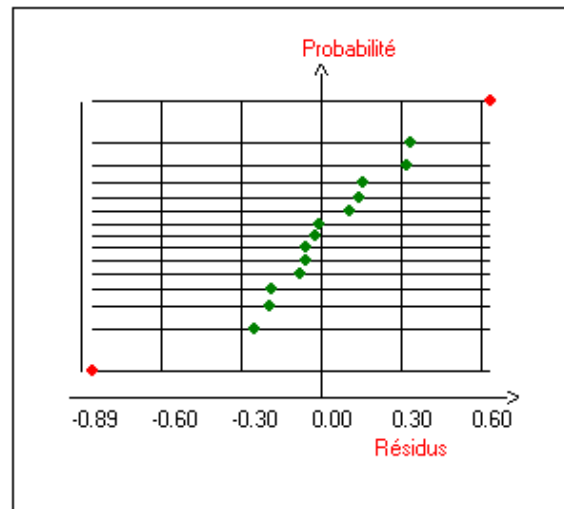


Figure III-10 : Droite d'Henry

❖ **Etape 14 : Modélisation de la réponse si le modèle est validé :**

D'après le tableau des effets, la réponse y_2 (le rendement de la DCO) peut être modélisée par l'équation suivante :

$$y_2(x_1, x_2, x_3) = 96,455 - 0,141 x_1 + 1,464 x_2 + 0,213 x_3 - 0,811 x_1^2 - 1,836 x_2^2 + 1,715 x_1 x_2 - 0,767 x_1 x_3 - 0,307 x_2 x_3.$$

❖ **Etape 15 : Recherche de la solution optimale :**

L'objectif de notre étude est de rechercher les conditions optimales pour le problème posé, c'est-à-dire les réglages des trois facteurs (débit de l'urée, débit du phosphate d'ammonium et débit de l'eau utilisée pour la préparation du floculant) amenant à minimiser le coût tout en respectant la condition suivante : un rendement de la DCO supérieur à 90%.

D'un point de vue économique, on a intérêt à fixer le facteur 3 au niveau qui minimise la consommation du floculant. Car le floculant est utilisé en grande quantité par rapport aux autres produits, en plus il est le plus cher. Donc, on fixe le facteur 3 au niveau +1.

En fixant le facteur 3 au niveau +1, on obtient comme présentation graphique : les deux courbes isoréponse 2D et 3D.

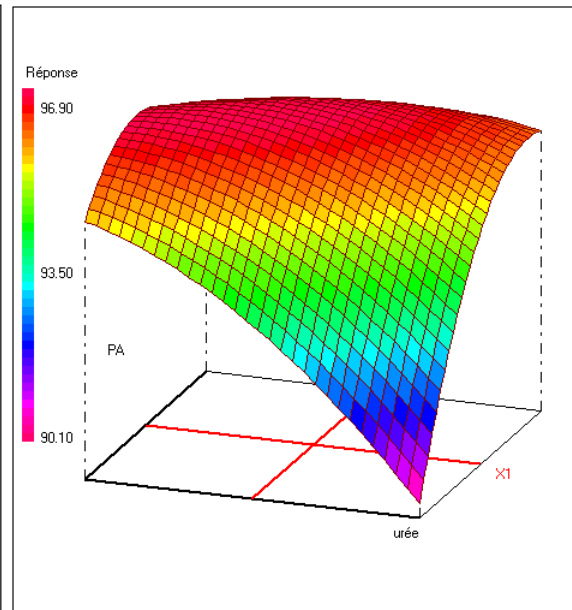
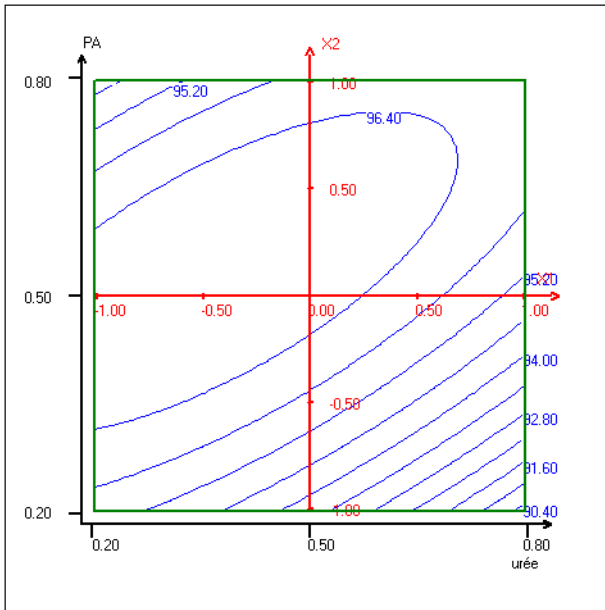


Figure III-11 : Etude graphique 2D

Figure III-12 : Etude graphique 3D

Variation de la réponse - Rendement (DCO) dans le plan : urée, PA

FACTEURS FIXES : - eau dkfloc = 900 l/h

D'après les graphes 2D et 3D on a donc la liberté de choisir le réglage qu'on veut. Mais dans le but de rechercher un bon rapport qualité-coût, on va fixer les autres facteurs dans les niveaux qui minimisent leur consommation (niveau -1 pour les deux facteurs), la réponse prédite en ce point est $95,48 \pm 0,59$.

Si l'on revient aux grandeurs réelles, les conditions optimales sont les suivantes :

- ✓ Le débit de l'urée sera fixé à 0,2 l/h.
- ✓ Le débit du phosphate d'ammonium sera fixé à 0,2 l/h.
- ✓ Le débit de l'eau de la préparation du floculant DKFLOC sera fixé à 900 l/h.

❖ Etape 16 : Validation expérimentale de la solution retenue :

Le modèle qu'on a établi explique bien les résultats expérimentaux. Tous les tests d'évaluation le confirment. Mais, avant d'utiliser ce modèle, il faut le valider.

La validation du modèle consiste à réaliser un essai complémentaire en dehors des essais du plan d'expériences.

Comme point test, on a choisi les réglages de la solution retenue. Le tableau ci-dessous présente la valeur théorique et celles expérimentales trouvées.

Tableau III-18 : Résultats de la validation expérimentale de la solution retenue

N° point test	Débit urée	Débit phosphate	Débit eau	Réponse	Réponse
---------------	------------	-----------------	-----------	---------	---------



		d'ammonium	préparation du floculant	théorique	expérimentale
1	0,2	0,2	900	$95,48 \pm 0,59$	95,73
2	0,2	0,2	900	$95,48 \pm 0,59$	95,11

D'après les résultats du tableau, on voit clairement que les réponses mesurées se trouvent effectivement dans l'intervalle de confiance [$95,48 - 0,59$; $95,48 + 0,59$] proposé par le logiciel Nemrod.

❖ **Etape 17 : Conclusion de l'étude :**

Cette étude a montré qu'un modèle polynômial d'ordre deux semble modéliser correctement le rendement de la DCO en tout point du domaine expérimental étudié. Il apparaît que les conditions expérimentales optimales (c'est-à-dire celles permettant de minimiser le coût dû aux trois produits chimiques utilisés) sont obtenues pour les niveaux codés suivants : $x_1 = -1$, $x_2 = -1$ et $x_3 = +1$.

En revenant aux unités initiales ceci correspond donc aux réglages donnés ci-dessous :

- ✓ Facteur 1 : 0,2 l/h ;
- ✓ Facteur 2 : 0,2 l/h ;
- ✓ Facteur 3 : 900 l/h.

A l'aide de la méthodologie des plans d'expériences, on n'a pas pu modéliser le résultat des MES à cause du problème du bruit qui influence les résultats donné par la balance analytique.



Conclusion générale

Le travail que j'ai effectué au sein de la station d'épuration des eaux résiduaires de la CBGN, a permis d'une part de réaliser un suivi permettant de quantifier ses dépenses pour assurer le traitement de ses rejets (9,4 DH/m³).

D'autre part, mon travail a consisté à optimiser ce coût tout en respectant les performances épuratoires de la station. Cette optimisation a concerné : l'électricité, l'eau de la RADEEF et les produits chimiques utilisés.

- Pour la consommation électrique, le passage de l'utilisation de 3 supprimeurs à l'utilisation de 2 supprimeurs a permis une nette diminution de la consommation électrique (passage de 2016 à 1702 KW/j).

- Pour la consommation de l'eau de la RADEEF, l'installation d'un filtre (qui a pour rôle de retenir les MES) à la sortie du bassin de désinfection, aura comme résultat la diminution de la consommation de l'eau d'à peu près 85%.

- Pour la consommation des produits chimiques,

✓ La réduction du domaine d'injection de l'acide sulfurique dans le bassin de répartition et dans le bassin de désinfection (6,5-8 → 7,5-8), va permettre de diminuer sa consommation.

✓ En se basant sur la méthodologie des plans d'expériences, on a réussi à modéliser la réponse : rendement de la DCO en fonction des trois produits chimiques (urée, phosphate d'ammonium et flocculant) par le modèle polynômial suivant :

$$y_2(x_1, x_2, x_3) = 96,455 - 0,141 x_1 + 1,464 x_2 + 0,213 x_3 - 0,811 x_1^2 - 1,836 x_2^2 + 1,715 x_1 x_2 - 0,767 x_1 x_3 - 0,307 x_2 x_3.$$

Grâce à ce modèle, on a pu par la suite optimiser ces trois produits chimiques tout en respectant un rendement (DCO) > 90%. Le tableau suivant réunit les conditions optimales trouvées :

Débit de l'urée	0,2 l/h
Débit du phosphate d'ammonium	0,2 l/h
Débit de l'eau de la préparation du flocculant	900 l/h

Ces réglages ont conduit à :

- Une diminution de la consommation de l'urée et du phosphate d'ammonium jusqu'à 60% (0,5 l/h → 0,2 l/h).

- Une diminution de la consommation du flocculant jusqu'à 11,1% (2,025 g/l → 1,8 g/l).

Mais, cette méthodologie des plans d'expériences n'a pas permis de donner des résultats interprétables pour la réponse : MES à cause des fluctuations importantes des mesures dues au niveau élevé du bruit au laboratoire.



Annexe

Annexe 1 : Mode opératoire de la détermination de la MES

a) Objet :

Cette méthode permet de déterminer les matières en suspension dans les eaux usées par filtration.

b) Appareillage :

- 1) Balance de précision de $\pm 0,0001\text{g}$
- 2) Etuve de séchage à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 3) Membranes de filtration de porosité $0,45\mu\text{m}$
- 4) Rampe de filtration
- 5) Pompe à vide

c) Mode opératoire :

- Sécher le filtre pendant quelques minutes dans l'étuve ;
- Laisser refroidir le filtre pendant quelques minutes ;
- Peser le filtre et noter son poids (M_1) ;
- Placer le filtre dans le dispositif de filtration ;
- Prélever 25 ml de l'échantillon à analyser ;
- Filtrer l'échantillon en mettant en service la pompe à vide ;
- Libérer le dispositif pour retirer avec précaution le filtre ;
- Sécher le filtre dans l'étuve à $105 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 1 heure ;
- Peser le filtre et noter le poids M_2 .

d) Résultat :

$$\text{MES} = \frac{M_2 - M_1}{V} \times 10^6$$

MES : matière en suspension (mg/l)

V : volume de l'échantillon (ml)

M_1 : poids du filtre sec avant filtration (g)

M_2 : poids du filtre sec après filtration (g)



Annexe 2 : Mode opératoire de la détermination de la DCO

a) Objet :

Cette méthode permet de déterminer la quantité d'oxygène consommée par les matières oxydables présentes dans l'eau.

b) Principe :

Les substances oxydables réagissent avec le bichromate de potassium sulfurique, en présence de sulfate d'argent. Le chlorure est masqué avec du sulfate de mercure. La coloration verte du Cr^{3+} sera déterminée photométriquement.

c) Appareillage :

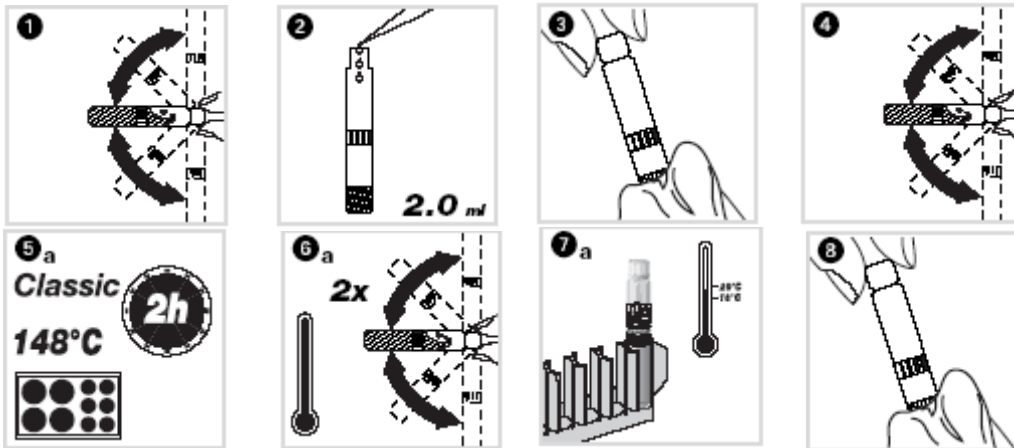
- Thermostat
- Spectrophotomètre

d) Réactifs :

Réactifs préparés : réf : LCK 514

e) Mode opératoire :

- 1) Mélanger le contenu de la cuve (tube) pour avoir une solution homogène ;
- 2) Pipeter 2.0 ml d'échantillon d'eau usée avec précaution ;
- 3) Fermer la cuve et nettoyer l'extérieure de celle-ci ;
- 4) Bien mélanger le tube ;
- 5) Chauffer dans le thermostat : 2h à 148°C ;
- 6) Sortir la cuve chaude : Retourner 2 fois avec précaution ;
- 7) Laisser refroidir à température ambiante dans le support de cuve ;
- 8) Bien nettoyer l'extérieure de la cuve et mesurer : Les résidus doivent être complètement éliminés avant l'évaluation. Bien nettoyer l'extérieure de la cuve et mesurer dans le spectrophotomètre.





Liste des abréviations

- CBGN : Compagnie des Boissons Gazeuses du Nord
- STEP : Station d’Epuraton
- PET : Polyéthylène Téréphtalate
- BA : Boues Activées
- DCO : Demande Chimique en Oxygène
- DCO (S) : Demande Chimique en Oxygène à la sortie du flottateur
- DCO (E) : Demande Chimique en Oxygène à l’entrée du tamis fin
- R (DCO) : Rendement de la Demande Chimique en Oxygène
- MES : Matières En Suspension
- MES (S) : Matières En Suspension à la sortie du flottateur
- DBO₅ : Demande Biologique en Oxygène
- DBO₅ (S) : Demande Biologique en Oxygène à la sortie du flottateur
- Ondeo IS : Ondeo Industrial Solutions
- RADEEF : Régie Autonome de Distribution d’Eau et d’Electricité de Fès
- 2D : 2 dimensions
- 3D : 3 dimensions
- ANOVA : Analysis Of Variance = analyse de la variance
- Y_{exp} : réponse expérimentale (mesurée)
- Y_{calc} : réponse calculée (prédite par le modèle)
- CV : Coefficient de Variation
- s : écart-type



Bibliographie & webographie

- Traitement des effluents industriels à Fès, Ahmed BELKHEIRI, Directeur de l'Agence de Bassin du Sebou 23 et 24 juin 2008 – Paris.
- Article : Maroc : la station d'épuration des eaux usées de Fès produira 50% de l'électricité dont elle a besoin ; M. Abdallah Darkaoui, publié le 28 mai 2008 sur le site de Le Matin.ma.
- Ecole nationale supérieure du pétrole et des moteurs : traitement des eaux, F Berné & J Cordonner.
- Pierre CHAGNON, LES PLANS D'EXPÉRIENCES (PARTIE 1) : Principes généraux.
- Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques, Mathématiques et Applications : La notion de plan d'expérience, W. Tinsson.
- Introduction aux plans d'expériences 3e édition, Jacques Goupy / Lee Creighton,
- Cours validation de méthodes d'analyses : Mesure, Jacques Le Saint.