



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah

Faculté des Sciences et Techniques

www.fst-usmba.ac.ma



Année Universitaire : 2015-2016

Master Sciences et Techniques GMP Génie des Matériaux et des Procédés

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

Détermination de la vitesse de corrosion des circuits de refroidissement et l'instauration des cartes de contrôle de la station de traitement des eaux

Présenté par:

- SAMIH Loubna

Encadré par:

- Pr. Hicham CHTIOUI (FST Fès)
- M. Abdelkrim BARAKATALLAH (SONASID)

Soutenu Le 17 Juin 2016 devant le jury composé de:

- Pr. CHTIOUI Hicham
- Pr. CHAOUQI Mohammed
- Pr. SKALI Mohammed Khalid

Stage effectué à : SONASID Jorf Lasfar



Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mon très cher père qui m'a toujours soutenu et encouragé, je lui témoigne ma
profonde gratitude et mon ample vénération.*

*A ma mère qui n'a guère cessé de prier pour moi, et qui m'a grandement aidé, à
sa manière ;*

A l'âme de mon cousin Yassine, Que dieu le préserve au fond de ses édens ;

A mes sœurs pour leur encouragement perpétuel;

Un remerciement spécial à mon âme sœur Sarah ;

A toute ma grande famille;

*A tout le personnel de la Sonasid qui m'a accueilli, conseillé le long de ce
stage ;*

A mes amis pour leur soutien;

A tous ceux qui me sont chers.

Loubna SAMRA

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier chaleureusement le professeur **Hicham CHTIOUI** pour son encadrement pédagogique, sa disponibilité, et ses conseils précieux.

Je remercie également mon encadrant dans l'entreprise « SONASID » **Abdelkrim BARAKATALLAH**, pour son accueil, son support et ses conseils.

Mes remerciements vont aussi à l'équipe de la station de traitement des eaux avec qui j'ai mené l'étude du projet de bout en bout, et je cite ici tout particulièrement, **Mohammed BERRISSOUL** et **Mohammed El MALIKI** et **Kamal FATOIKI**.

Enfin, j'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury les professeurs : **CHAOUQI Mohammed** et **SKALI Mohammed Khalid** qui m'ont honoré et accepté de juger ce travail, ainsi qu'aux professeurs de la Faculté des Sciences et Techniques Fès pour ces deux ans d'enseignement et pour la qualité de la formation.

Loubna SAMRA

Liste des figures

<i>Figure 1. 1 : Organigramme de Sonasid.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 1. 2 : Procédé général de fabrication des ronds à béton à Sonasid.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 1. 3 Schéma synoptique du procédé global de fabrication des ronds à béton.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 2.1 : l'état des éprouvettes avant et après.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 2.2 : la vitesse de corrosion dans les circuits de refroidissement.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 2.3 : la variation de la vitesse de corrosion avec le temps.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 2.4 : la quantité des amines dans les circuits Laminoir.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 2.5 : la quantité des amines dans les circuits d'Acierie.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 2.6 : la vitesse de corrosion par les deux méthodes.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 3.1: carte de contrôle X du filtre laminoir avant lavage.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 3.2 : Carte de contrôle R filtre 1 Laminoir avant lavage.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 3.3 : Carte de contrôle X filtre Laminoir après lavage.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 3.4: Carte de contrôle R filtre Laminoir après lavage.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 3.5: Carte de contrôle X du filtre1 C.A.D avant lavage.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 3.6 : Carte de contrôle X du filtre1C.A.D après lavage.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 3.7 : Carte de contrôle X filtre2 C. A.D avant lavage.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 3.8 : Carte de Contrôle X filtre 2 C.A.D après lavage.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 3.9 : La Turbidité des filtres à sable Acierie.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 3.10 : La MES des filtres à sable Acierie.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 3.11 : Carte de contrôle X filtre C.A.I avant lavage.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 3.12 : Carte de contrôle X filtre C.A.I après lavage.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 3.13 : Diagramme d'Ishikawa de colmatage des filtres à sable.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 3.14 : carte de contrôle R de l'osmoseur.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 3.15 : carte de contrôle R de l'osmoseur.....</i>	<i>39</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1. 1 : Fiche signalétique de la SONASID.....</i>	<i>3</i>
<i>Tableau 1. 2 : Les dates marquantes de l'histoire de SONASID.....</i>	<i>3</i>
<i>Tableau 1.3 : les résultats des analyses selon la norme.....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 2.1 : les résultats de la méthode « mise en place des éprouvettes».....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2.2 : la vitesse de corrosion avec et sans inhibiteur.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 3.1 : la pression différentielle du filtre à sable laminoir avant lavage.....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 3.2: la pression différentielle du filtre à sable laminoir après lavage.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 3.3 : Test de normalité des filtres à sable de circuit direct.....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 3.4 : Test de normalité de filtre à sable de circuit indirect.....</i>	<i>35</i>

Liste des abréviations

A

APC : Affinage en Poche Chauffante.

B

BC : Barre courte.

C

CC : Courant Continue

CD : Circuit Direct.

CI : Circuit indirect.

CCL : Coutinous Cutting Length.

F

FAE : Four à Arc Electrique.

FAI : Filtre Aciérie Indirect.

FAD : Filtre Aciérie Direct.

L

LC : Limite de Contrôle.

LIC : Limite Inférieure de Contrôle.

LSC : Limite Supérieure de Contrôle.

M

MES : Matière En Suspension.

MSP : Maîtrise Statistique des Processus.

MCC : Machine à Coulée Continue

N

NM : Norme Marocaine.

P

PAB : Parc à Billettes.

S

SNI : Société Nationale d'Investissement.

T

TA: Titre Alcalimétrique.

TAC : Titre Alcalimétrique Complet.

.

Sommaire

Dédicaces	i
Remerciements	iii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations	v
Introduction	1
Chapitre 1	2
Présentation du contexte de travail.....	2
1. Présentation générale de Sonasid	2
1.1 Dates marquantes de l’histoire de SONASID	3
1.2 Organigramme.....	3
2. Site industriel de Jorf Lasfar	4
2.1 Description globale du procédé de fabrication.....	4
2.2 Présentation de la station de traitement des eaux	6
2.2.1 Circuit d’eau direct	7
2.2.2 Circuit d’eau indirect.....	8
2.2.3 Circuit d’eau fermé.....	8
2.2.4 Osmose inverse	8
2.2.5 Analyses d’eau après le traitement	9
Chapitre 2 :	12
Détermination de la vitesse de corrosion des circuits de refroidissement (Laminoir, Aciérie).....	12
1. Généralités sur la corrosion.....	12
1.1 Définition de la corrosion.....	12
1.2 Principaux types de la corrosion	12
2. Généralités sur les inhibiteurs de corrosion.....	13
2.1 Propriétés des inhibiteurs	14
2.2 Classes des inhibiteurs.....	14
3. Application des méthodes de détermination de la vitesse de corrosion	15
3.1 Mesure de la vitesse de corrosion par gravimétrie	15
3.2 Mesure électrique de la vitesse de corrosion.....	21

4. Protection et lutte contre la corrosion.....	22
Chapitre 3 :	24
Les cartes de contrôle aux mesures de Shewhart pour la station de traitement des eaux.....	24
1. Nature des cartes de contrôle :	24
2. Cartes $\frac{\bar{x}}{R}$ pour les équipements de la station de traitement des eaux :.....	24
2.1 Cartes de contrôle $\frac{\bar{x}}{R}$ pour les filtres à sable :.....	26
2.1.1 Carte de contrôle pour filtre à sable Laminoir :.....	26
2.1.2 Cartes de contrôle $\frac{\bar{x}}{R}$ des filtres à sable Acérie :.....	32
2.1.3 Diagramme d'Ishikawa de colmatage des filtres à sable.....	36
2.2 Cartes de contrôles $\frac{\bar{x}}{R}$ pour l'osmose inverse :.....	38
Conclusion.....	40

Introduction

Dans l'objectif d'améliorer le procédé de traitement des eaux de refroidissement, la société nationale de la sidérurgie (SONASID) s'est lancée dans une démarche d'amélioration des situations de travail dans les zones de traitement des eaux, en tenant compte des exigences des normes et budgétaires.

Le présent projet de fin d'études est axé sur le développement du processus en termes de la qualité de l'eau et de la minimisation des consommations des circuits de refroidissement, ainsi que le contrôle des équipements utilisés pour le traitement, ce développement ne se réalisera que lorsqu'on déterminera tous les problèmes rencontrés aux niveaux du circuit de refroidissement et parmi ces problèmes, on constate que c'est plutôt la corrosion qui est très présente voire fréquente.

On participe donc à cette amélioration, notre mission est d'étudier la vitesse de la corrosion des circuits de refroidissement des eaux ainsi que l'élaboration des cartes de contrôle de la station de traitement des eaux.

Dans cette optique, la démarche choisie pour ce projet s'articule autour des principaux volets suivants:

Dans le premier chapitre, on présente l'entreprise ainsi la description globale du procédé de fabrication, ensuite, on décrit plus particulièrement la station de traitement des eaux de refroidissement.

Le second chapitre est consacré à la recherche des méthodes de détermination de la vitesse de corrosion, ainsi qu'à l'application de ces derniers, pour enfin établir une comparaison entre eux pour identifier la teneur de la corrosion, en vue de trouver des solutions propices et applicables en prenant en considération le coût.

Le troisième chapitre a pour objet d'étude l'instauration des cartes de contrôle des équipements utilisés dans le traitement des eaux de refroidissement. Ceci nous permettra de vérifier si l'opération que réalise cet équipement est maîtrisée. Dans le cas contraire, on dénombre toutes les causes qui font en sorte de freiner sa maîtrise, et puis, on met les causes principales dans le diagramme d'Ishikawa pour bien limiter la situation afin de résoudre le problème efficacement et réussir la maîtrise du processus.

Chapitre 1

Présentation du contexte de travail

La connaissance du contexte de travail s'avère une étape incontournable avant d'entamer l'étude du projet. Dans ce sens, ce chapitre sera consacré à une présentation abrégée du groupe SONASID, un aperçu général sur le site industriel de Jorf Lasfar et une description du procédé de fabrication.

Une attention particulière sera portée à la zone de travail (Station de traitement des eaux de refroidissement) dans laquelle s'est déroulé notre projet de fin d'études, il sera question de parler de ses activités.

1. Présentation générale de Sonasid

Sonasid ou Société nationale de sidérurgie est une entreprise dédiée principalement au secteur de la construction.

Créé depuis 1974 par l'état marocain dont l'ambition était de développer un complexe sidérurgique complètement intégré à partir de la production du minerai de fer à Nador et en le valorisant dans un haut fourneau d'un million de tonnes. Les études technico-économiques menées durant de nombreuses années ont abouti à l'opportunité d'un simple laminoir avec une intégration progressive en amont. C'est ainsi que fut lancé le premier maillon d'une sidérurgie nationale dédiée principalement au secteur de la construction.

La production a démarré en mars 1984 avec le laminoir de Nador alimenté des billettes importées. Le laminoir était d'une capacité de production initiale de 420 000 tonnes qui a été portée progressivement à 600 000 tonnes par an de ronds à béton et fil machine. [1]

Devant la demande croissante du marché, Sonasid s'est décidé de lancer encore une fois un deuxième laminoir à Jorf lasfar en 2002. Un an plus tard, Sonasid concrétise son projet d'intégration en amont par la réalisation d'une aciérie électrique à Jorf lasfar qui devra alimenter les deux laminoirs en billettes pour réduire sa dépendance du marché international. L'aciérie électrique a nécessité un investissement de 1035 MDH pour une capacité de production comprise entre 800 000 et 1 000 000 tonnes de billettes par an.

La fiche signalétique de Sonasid est donnée par le tableau 1.1.

Tableau 1. 1 : Fiche signalétique de la SONASID

Raison sociale	Société nationale de la sidérurgie
Statut juridique	Société anonyme
Secteur d'activité	Métallurgie
Produits	Ronds lisses pour béton armé, barre et fil machine
Effectif	Entre 500 et 1000 dont 110 cadres
Emplacement	NADOR- JORF LASFAR-Casablanca
Adresse « siège »	Twin center, 18 ème étage, Bd Massira Alkhadra, 20000 CASABLANCA MAROC
Tél/Fax	00 212 623 38 94 00 / 00 212 623 34 52 39
Chiffre d'affaire	4775 MDH
Capital	2161 MDH
Capacité de production	860 000 T/an

1.1 Dates marquantes de l'histoire de SONASID

SONASID a été marquée par différentes dates regroupées dans le tableau 1.2 :

Tableau 1. 2 : Les dates marquantes de l'histoire de SONASID

1974	Création de SONASID.
1984	Démarrage de la production du Laminoir Nador.
1991	Libéralisation des importations.
1996	Introduction de 35% du capital en bourse.
1997	Cession par l'Etat de 62% du capital de SONASID à un consortium d'investisseurs institutionnels pilotés par la SNI.
1998	Acquisition de Longo métal Industries.
2000	Lancement des travaux de réalisation du laminoir de Jorf Lasfar.
2001	Fusion avec la filiale Longo métal Industries.
2002	Démarrage du laminoir à JORF LASFAR.
2003	Certification ISO 9001 versions 2000.
2004	Certification NM (Norme Marocaine) du rond à béton de JORF LASFAR.
2005	Démarrage de l'aciérie électrique d'une capacité de 650 000 t/an.
2006	Partenariat entre ArcelorMittal et SNI pour le développement de SONASID.
2009	Lancement du projet SAP.
2011	Mise en service d'un broyeur à Jorf Lasfar.

1.2 Organigramme

La structure de Sonasid s'articule autour d'une organisation hiérarchique présentée par l'organigramme de la figure 1.1 :

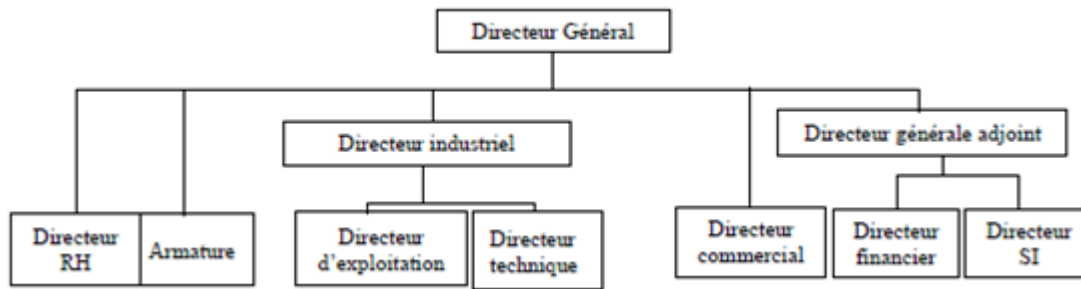


Figure 1. 1 : Organigramme de Sonasid

2. Site industriel de Jorf Lasfar

À 17 km au sud de la ville d’El Jadida, à 2 km du port de Jorf Lasfar, se trouve le complexe sidérurgique intégré (Aciérie / Laminoir) qui produit des barres en se reposant sur le recyclage des produits ferreux.

La capacité de l’usine est 300 000 t/an de produits en barres réparties en rond de 8mm à 40mm de diamètre. Le site mesure environ 700 mètres de long par 420 mètres de large. Le terrain s’élève à 50 mètres au-dessus du niveau de la mer. Une sous station de la RADEEJ de 60 MVA est implantée au sud du site. Autre que les locaux de la direction et les magasins de distribution, on y trouve trois unités, la première appelée broyeur ensuite l’aciérie et finalement le laminoir.

2.1 Description globale du procédé de fabrication

Le procédé de fabrication des barres à la Sonasid, présenté par la figure 1.2, passe par trois phases fondamentales : la préparation de la ferraille, suivi par la production des billettes et achevé par le laminage des billettes en barres.

Le procédé de fabrication des barres est détaillé pour chacune des 3 phases, en Annexe 1.

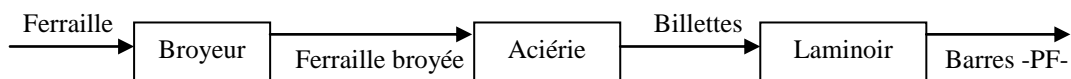


Figure 1. 2 : Procédé général de fabrication des ronds à béton à SONASID

La ferraille reçue est broyée dans l’unité broyeur, elle est ensuite transportée par un convoyeur Consteeel jusqu’au four à arc électrique (FAE) ou elle sera fondue. La ferraille fondue est transférée vers la machine à coulée continue via un four poche. A la sortie de la machine à coulée continue, la fonte est déversée dans le répartiteur et coule le long des lingotières pour entamer sa solidification grâce au jet d’eau. Chaque coulée produit des billettes longues qui sont ensuite coupées au chalumeau en raison de 54 à 65 billettes d’une

longueur de 12 à 13 mètres chacune, ces billettes sont stockées ensuite dans le PAB qui peuvent être laminées directement ou refroidies et mises au stock pour être laminées ultérieurement. Au niveau du laminoir, on réchauffe les billettes (produits finis de l'aciérie) dans un four à fuel afin de les laminier à chaud au niveau des trois trains : dégrossisseur, intermédiaire et finisseur.

A la sortie du train de laminage on trouve la boîte à eau qui permet de refroidir le rond à béton dans des conditions bien déterminées pour obtenir la résistance désirée. Enfin, dans la zone de finissage on achève le refroidissement des billettes de 72m et on les cisaille en barres de 12m. On contrôle, puis on délivre le produit vers la zone d'expédition. Le schéma global du procédé de fabrication est décrit sur la figure 1.3.

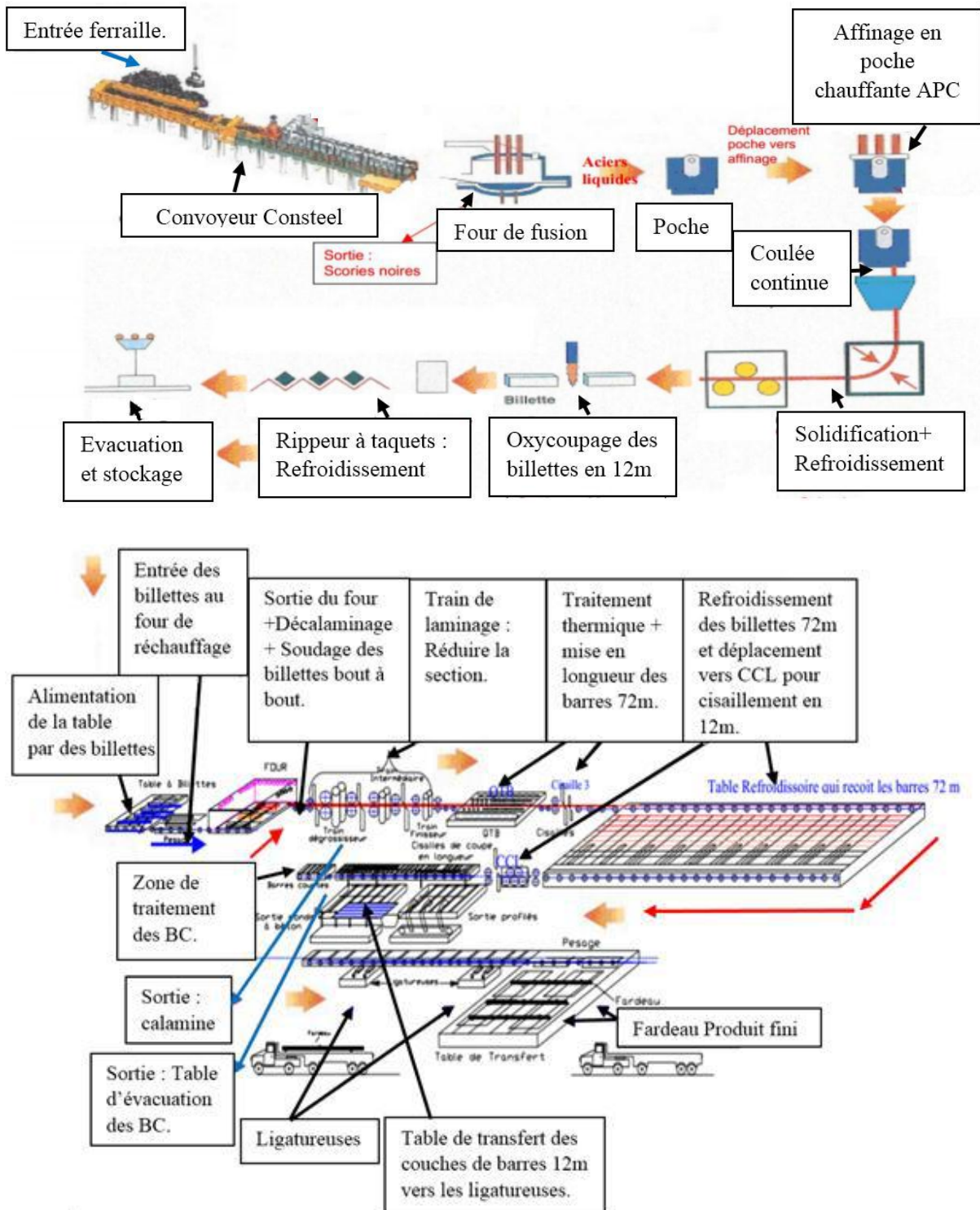


Figure 1. 3 Schéma synoptique du procédé global de fabrication des ronds à béton

2.2 Présentation de la station de traitement des eaux :

Le domaine sidérurgique nécessite une grande utilisation des eaux, parmi les bienfaits de SONASID c'est la minimisation de la consommation des eaux, ce qui implique un

traitement adéquat, La sidérurgie est l'un des plus importants utilisateurs et consommateur d'eau du secteur industriel. Les usages de l'eau y sont multiples et variés.

L'eau a d'innombrables usages et différentes fonctions (refroidissement des appareils, extinction de produits incandescents, épuration de gaz et de fumées, production de vapeur,...).

Parmi ses fonctions, c'est celle du refroidissement qui est la plus répandue et l'entreprise SONASID applique cette fonction dans tous les procédés. L'installation a pour but de traiter et de refroidir l'eau provenant des machines de l'aciérie et du laminoir; la chaleur éliminée par l'eau à cycle continu est dégagée dans l'air environnant grâce à l'auto évaporation dans les tours de refroidissement à l'eau et dans les échangeurs à plaques.

La station de traitement des eaux se subdivise en deux tranches, l'une consacrée au traitement des eaux de refroidissement du laminoir qui est constituée de deux circuits (direct et indirect), l'autre au traitement des eaux du refroidissement de l'aciérie qui est à son tour constituée de trois circuits (direct, indirect et fermé). Il existe différents types de traitement selon les propriétés des trois circuits qu'on va décrire ci-dessous :

2.2.1 Circuit d'eau direct :

C'est un circuit semi-ouvert, il a pour objectif le refroidissement des joints du four, les cylindres des cages, les rouleaux des boucleurs, (le refroidissement des trains dégrossisseurs, intermédiaires et finisseurs), l'acier traité dans la MCC.

Le rejet est généralement chargé en calamine, graisses, huiles et en morceaux des produits finis, qui proviennent du fonctionnement du laminoir et aciérie, les eaux exigent donc avant leur réutilisation une purification qui comprend les traitements suivants :

Décantation, Flocculation :

Après le refroidissement, l'eau subit la première étape de son traitement, qui est le passage dans Scale pit, ce dernier élimine la grosse calamine avec l'addition d'un flocculant (5kg/j) afin d'accélérer la flocculation-décantation de la calamine.

L'eau utilisée pénètre dans un bassin de décantation pour améliorer la qualité des eaux prétraitées. Il est muni d'un système de raclage des calamines de fond et d'écumage des huiles et graisses. Ce système achemine la fine calamine vers la fosse de récupération et transfère les huiles et graisses vers la bande de déshuilage.

Filtration :

Après la décantation, l'eau est pompée vers les filtres, cette opération s'effectue dans un système des filtres à sable sous pression.

A cause des impuretés retenues, l'augmentation de la perte de charge est importante pendant le cycle de filtration, ceci nécessite un lavage journalier par flux inverse.

Tour de refroidissement :

L'eau qui arrive chaude passe dans les tours de refroidissement, l'eau refroidie est récupérée dans le bassin de stockage avec une température de 25 °C à 30 °C.

Après le stockage dans le bassin, l'eau subit un traitement chimique qui est le suivant :

- Addition du biocide : injection par choc dans le bassin d'eau directe, 80kg/semaine
- Addition d'un inhibiteur: pour minimiser la corrosion, ce produit est pompé à pulsion automatique vers le bassin de stockage d'eau directe, presque 220 ml/h.

2.2.2 Circuit indirect

L'eau de circulation à l'intérieur de ces circuits s'emploie pour refroidir l'eau provenant des circuits sans contact des parties suivantes : machine CC, installation d'oxygène, compresseurs, FAE, four poche, pré-chauffeur et côté secondaire MCC des échangeurs à plaques.

L'eau indirecte ne subit pas tous les traitements effectués au circuit direct, elle est moins chargée car elle n'est pas en contact avec le four et le produit. Elle subit uniquement les traitements suivants :

- ✓ Passage par les tours de refroidissement
- ✓ Traitement chimique par l'ajout de certains biocides et inhibiteur.

2.2.3 Circuit d'eau fermé :

Un circuit pour l'eau de refroidissement de la lingotière MCC se compose d'un échangeur de chaleur (échangeur à plaques), d'un bac collecteur de l'eau refroidie (eau du circuit indirect), et d'une station de pompage. L'eau dans ce cas est recyclée après refroidissement par passage dans un échangeur à plaques où il y a un échange thermique entre l'eau qui revient chaude et l'eau du circuit indirect qui assure le refroidissement, après cette opération l'eau du circuit fermé est stockée dans son bassin, par conséquent l'eau indirecte devient chaude, ce qui nécessite le passage dans la tour de refroidissement avant le stockage. Ce circuit comprend également des doseurs appropriés pour les agents chimiques de conditionnement de l'eau.

2.2.4 Osmose inverse :

Le traitement d'eau de chaque circuit nécessite un refroidissement afin d'obtenir la température refroidissante, après l'évaporation qui résulte du refroidissement d'eau, on

obtient sa consommation, donc pour récupérer l'eau consommée, SONASID utilise une osmose inverse pour le traitement d'eau de RADEEJ afin d'ajuster les bassins de stockage. C'est le procédé le plus important pour le traitement d'eau brute qui vient de la RADEEJ, et par conséquent cette eau devient source d'alimentation des bassins de stockage des circuits de refroidissement (laminoir et aciérie).

Son principe de fonctionnement utilise une membrane semi-perméable afin de séparer les solides dissous, la matière organique, les virus et bactéries de l'eau. Le procédé est dit «inverse» car il nécessite une pression suffisante pour forcer l'eau pure à passer à travers la membrane. Ce procédé aboutit à de très bons résultats, car il peut éliminer de 95 à 99% des particules solides dissoutes et 99% des micro-organismes. [2]

L'eau brute est recueillie dans une cuve, puis pompée dans une batterie de filtration avec des filtres à charbon actif, de manière à éliminer le chlore résiduel et les solides suspendus et ensuite à la sortie des filtres à charbon, l'eau passe à des filtres à cartouches de sécurité, pour intercepter les particules les plus petites qui pourraient boucher les membranes perméables et ensuite une station de pompage boostée envoie l'eau à travers les récipients osmotiques, où l'eau déminéralisée et les eaux rejetées sont séparées.

L'eau d'appoint requise pour remplir les circuits et pour compenser la consommation (évaporation purges et pertes). L'eau rejetée de l'installation d'osmose inverse est envoyée dans une fosse de mélange et elle est employée après pour refroidir la tour d'extinction.

2.2.5 Analyses d'eau après le traitement :

Les études de qualité des eaux de refroidissement comportent trois étapes :

a. L'échantillonnage :

L'échantillonnage est primordial car il conditionne la pertinence de l'analyse. Il doit être de qualité mais également représentatif de ce que l'on veut analyser.

Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des récipients propres, rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser, puis fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans le flacon.

L'échantillonnage quotidien se fait comme suit :

- Pour la station de traitement des eaux laminoir on prélève 10 échantillons au total : 2 flacons correspondent aux circuits direct et indirect et 8 flacons des filtres à sable, on a 4 filtres et on prend pour chaque filtre un échantillon d'entrée et un autre de sortie.
- Pour la station de traitement des eaux Aciérie on prélève également 10 échantillons au total : 3 flacons pour les trois circuits (direct, indirect, fermé), 6 flacons

correspondent aux filtres (pour chaque filtre (on a 3 filtres à sable) : l'entrée et sortie).

Remarque : Il ne faut pas réaliser de prélèvement d'eau du circuit trop tôt après une vidange de l'installation, sinon l'eau analysée aura des caractéristiques proches de celles de l'eau d'appoint (eau osmosée). Un délai minimum de plusieurs heures est à respecter entre la vidange et le prélèvement. Et ce pour s'assurer de la représentativité du point choisi et s'assurer également que la conductivité ou la concentration en chlorures du circuit a une valeur habituelle.

b. Analyses physico-chimiques :

Après le traitement des eaux de refroidissement, il est recommandé voire obligatoire de faire des analyses physico-chimiques qui vont nous montrer si on est dans les normes, et si le traitement est valable. Ainsi, ces analyses permettront par la suite de contrôler le processus.

Ci-dessous les analyses effectuées pour le suivi quotidien des paramètres physico-chimiques d'eau :

1) **Le pH:** mesure la concentration d'une solution aqueuse en ions oxonium H_3O^+ et le degré d'acidité ou de basicité d'une solution.

2) **la conductivité :** Mesure la capacité d'une eau à conduire le courant électrique, sa valeur grandit lorsque la minéralisation totale de l'eau augmente. Elle est exprimée en $\mu S/cm$.

3) **L'alcalinité :** mesure la capacité de l'eau à neutraliser les acides, La mesure de l'alcalinité est d'une importance fondamentale dans le processus de traitement de l'eau, car c'est en fonction de sa teneur que s'établit le dosage des produits chimiques utilisés [3], on distingue deux type d'analyses titrimétriques :

- **Titre Alcalimétrique :** correspond à la mesure de la teneur d'une eau en hydroxydes et la moitié de sa teneur en carbonates alcalins et alcalino-terreux.
- **Titre Alcalimétrique Complet :** est la teneur d'une eau en hydroxydes, en carbonates, et en hydrogénocarbonates alcalins et alcalino-terreux.

4) **La dureté (T.H) :** Le titre hydrotimétrique est un indicateur de la minéralisation de l'eau, la dureté totale est calculée comme la somme des concentrations des ions calcium et magnésium dans l'eau, exprimés en carbonate de calcium.

5) **Dosage des chlorures :** En général, les chlorures sont présents dans les eaux à l'état brut et transformés à des concentrations allant de petites traces jusqu'à plusieurs centaines de mg/l. Ils sont présents sous la forme de chlorures de sodium, de calcium et de magnésium.

6) **Turbidité** : La turbidité de l'eau est due à la présence de matériaux solides en suspension qui réduisent sa transparence. Elle peut être également provoquée par la présence d'algues, de plancton, de matière organique et plein d'autres substances comme le zinc, le fer, le manganèse et le sable, résultant du processus naturel d'érosion ou de rejets domestiques et industriels [5].

7) **MES** : Les matières en suspension sont considérées parmi les principaux polluants du secteur sidérurgie. La teneur et la composition minérale ou organique des matières en suspension dans les eaux sont très variables.

c. L'interprétation :

La caractérisation des eaux concerne essentiellement l'analyse des paramètres de base (pH, température et conductivité, MES, Turbidité..) vu que ces derniers permettent de définir les caractéristiques fondamentales de l'eau ainsi qu'une estimation de la qualité du milieu. Le tableau ci-dessous représente les normes pour chaque circuit :

Tableau 1.3 : les résultats des analyses selon la norme

Paramètres	Unité	Eau osmosée	Circuit fermé	CI Aciérie	CD Aciérie	CI Laminoir	CD Laminoir
Température	°C	30	35	40	45	32	36
pH		6,5 - 8	7,5-9	7-9	7- 9	7-8,5	8,5
Conductivité	µs/cm	60	60	600	500	250	500
TA	ppm	0	30	NC	NC	15	30
TAC	ppm	20	120	200	120	40	200
Dureté (TH)	ppm	10	20	190	80	20	250
MES	ppm	0	NC	10	NC	NC	5
Turbidité	NTU	5	5	5	5	5	5
Chlorures	ppm	10	20	70	70	35	40

Chapitre 2 :

Détermination de la vitesse de corrosion des circuits de refroidissement

(Laminoir, Aciérie)

1. Généralités sur la corrosion :

L'utilisation de l'eau comme fluide thermique dans les circuits de refroidissement pose un certain nombre de problèmes tels que la corrosion, l'embouage et l'entartrage. Ceci peut entraîner une baisse de l'efficacité thermique du circuit, une perte du matériau métallique. Les pertes économiques liées à ces problèmes peuvent être importantes. Les désordres constatés dans les installations de l'eau sont essentiellement liés à sa composition, à son pH, à sa température mais également à la nature du matériau et aux conditions d'exploitation du système.

1-1 Définition de la corrosion :

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés.

La corrosion d'un matériau métallique est la perte en surface d'une partie de celui-ci, sous l'action d'un ou de plusieurs agents agressifs qui peuvent être : l'oxygène et/ou des constituants de l'air (H_2O humide, CO_2 , SO_2 , H_2S , brouillard salin, etc.), un gaz chaud (O_2 , CO , CO_2 , etc.), une solution (acide, basique, un sel fondu). [6]

1-2 Principaux types de la corrosion :

Il existe plusieurs types de corrosion, les types les plus rencontrés dans les circuits de refroidissement sont ci-dessous :

Corrosion généralisée ou uniforme :

La corrosion uniforme ou généralisée se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal entraînant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci ou simplement un changement de coloration.

Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est caractérisée par une attaque très localisée en certains points de la surface et provoque des piqûres. Cette forme de corrosion est produite par certains anions, notamment les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. La corrosion par piqûres affecte en particulier les métaux ou les alliages passivés (aciers, les alliages d'aluminium, etc.), ce type de corrosion comprend au moins deux étapes : l'amorçage qui se produit lors de la rupture locale de la passivité et la croissance ou propagation. [7]

✚ Corrosion par crevasse

Appelée aussi corrosion caverneuse, elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique. Il y a alors une attaque des parties métalliques les plus exposées à l'oxygène.

✚ Corrosion galvanique (bimétallique)

Ce type de corrosion résulte du couplage électrique de deux métaux différents et immergés dans la même solution. Le moins noble (l'anode) se corrode et le plus noble (la cathode) est protégé. Elle résulte de la formation d'une pile électrochimique.

✚ La corrosion microbienne

La corrosion microbienne est la conséquence d'interactions qui se manifestent entre des bactéries et les matériaux sur lesquels elles se sont fixées. Les bactéries peuvent être soit à l'origine d'une corrosion primaire, soit être des facteurs aggravants pour une corrosion préexistante. Dans ces deux cas, l'attaque corrosive peut être très rapide et avoir des conséquences très graves (rupture d'éléments, percement entraînant des fuites, dégradation des structures, etc).

Cette corrosion due aux bactéries sulfato-réductrices : les bactéries responsables de ce type de corrosion sont principalement des *Desulfovibrio*, des *Desulfomonas* et des *Desulfomaculatum*. Ce sont des bactéries anaérobies capables de transformer les sulfates et les sulfites en sulfures. La présence de ces bactéries dans les circuits de refroidissement est attestée par l'odeur particulière que dégagent les sulfures accumulés.

✚ Corrosion et dissolution sélective

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.

2. Généralités sur les inhibiteurs de corrosion

Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une "substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité ; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif". [8]

La définition d'un inhibiteur de corrosion n'est pas unique. Celle retenue par la "National Association of Corrosion Engineers" est la suivante : "un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration". [9]

2.1 Propriétés des inhibiteurs :

Partant de ces définitions, un inhibiteur de corrosion doit donc vérifier un certain nombre de propriétés fondamentales : abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en

conservant les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier ; être stable en présence d'autres constituants en particulier vis-à-vis de certains biocides ; être stable dans le domaine de températures utilisé ; être efficace à faible concentration ; être compatible avec les normes en vigueur de non-toxicité et de protection de l'environnement.

2.2 Classes des inhibiteurs :

Il existe plusieurs façons de classer les inhibiteurs de corrosion. Généralement, ils sont classés en fonction de leur domaine d'application, de la formulation des produits (inhibiteur organique, inhibiteur inorganique), de la réaction électrochimique inhibée (inhibiteur cathodique, inhibiteur anodique ou mixte), ou du mécanisme réactionnel mis en jeu (adsorption et/ou formation d'un film) [10,11]. Néanmoins, cette classification n'est pas tout à fait adéquate car un même inhibiteur peut présenter à la fois des caractéristiques propres à chaque groupe de classement.

- Selon leur composition chimique

✚ Les inhibiteurs organiques

Les inhibiteurs organiques représentent un groupe très important d'inhibiteurs de corrosion. L'efficacité de cette catégorie d'inhibiteurs est liée à la structure, à la concentration et aux propriétés chimiques de la couche formée selon les conditions précisées. L'action d'un inhibiteur organique est le résultat de son adsorption à la surface du matériau. Après cette adsorption, il a une double action ralentissant simultanément les processus anodique et cathodique.

✚ Les inhibiteurs inorganiques (minéraux)

Ces inhibiteurs minéraux sont utilisés en milieux alcalins et presque jamais en milieux acides. Les molécules minérales se dissocient en solution et les anions et cations assurent en fait l'inhibition. Les chromates, les molybdates, les silicates, les phosphates sont les plus importants inhibiteurs minéraux. Actuellement, l'emploi de la plupart de ces produits est réglementé car ils présentent un impact négatif sur l'environnement.

- Selon la nature électrochimique du processus

✚ Les inhibiteurs anodiques

Les inhibiteurs anodiques sont très nombreux. Ce sont des substances inorganiques comme les orthophosphates, silicates, chromates,...etc. Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion du matériau afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y a formation d'un film passif protecteur sur l'anode.

✚ Les inhibiteurs cathodiques

L'action de ces inhibiteurs se traduit par une diminution de la vitesse de la réaction cathodique. Ce sont généralement des cations qui peuvent migrer vers la surface cathodique, où

ils précipitent sous formes de sels basiques ou d'hydroxydes, formant des films adhérents et compacts. Les inhibiteurs cathodiques incluent des combinaisons de zinc, de nickel, de magnésium, des phosphates alcalins, des combinaisons d'arsenic....

Les inhibiteurs mixtes

Ils ont à la fois les propriétés des inhibiteurs anodiques et cathodiques comme « CETAMINE » qui est utilisé dans nos circuits de refroidissement des eaux.

3. Application des méthodes de détermination de la vitesse de corrosion

Il y a plusieurs méthodes pour contrôler la corrosion dans un circuit de refroidissement, qu'il soit fermé, direct ou indirect, donc pour combattre la corrosion, il est nécessaire de déterminer sa vitesse. Au premier temps, on applique les deux méthodes ci-dessous :

3.1 Mesure de la vitesse de corrosion par gravimétrie :

La méthode est ancienne, mais c'est un progrès par rapport à l'observation naturelle. Elle consiste à immerger en des endroits bien précis d'un circuit, les éprouvettes de corrosion; Le métal constituant l'éprouvette est fonction de la recherche que l'on veut effectuer et en général elle est de la qualité du ou des métaux constitutifs du circuit concernés par les risques de corrosion. [12]

En général, les éprouvettes sont posées dans des portes éprouvette qui peuvent en accepter plusieurs, ceci permettant de les relever périodiquement en fonction du temps d'immersion choisi. Avec un nombre suffisant d'éprouvettes, un examen chaque mois est un rythme de contrôles et d'examens qui donne satisfaction.

On commence d'abord par cette méthode, on installe dans chaque circuit de refroidissement une éprouvette de corrosion d'acier et dans le circuit primaire on installe deux éprouvettes de corrosion, une d'acier et une autre de cuivre vu que la lingotière est en cuivre, après 768 h, on prélève les éprouvettes puis on les nettoie avec l'eau distillée, l'acide sulfurique, selon l'état d'éprouvette, et on passe directement à l'étape du pesage.










Les mesures de perte de masse donnent une estimation directe de la vitesse de corrosion de l'acier immergé dans les circuits de refroidissement en présence d'agents agressifs. La vitesse de corrosion est déterminée après 768 h (32 jours) d'immersion. Elle est calculée par la formule suivante :

$$V = \frac{\Delta m}{S * t} \quad \text{en (mg/h.cm}^2\text{)}$$

- Δm représente la différence entre la masse initiale $M1$ et la masse finale $M2$ après un temps égal à 768 h.

- S est la surface d'éprouvette de corrosion = 25,625 cm² (L=1,5 cm/ l=7,5 cm/e=0,2 cm).

Le poids de chaque éprouvette de corrosion ainsi que le numéro et le temps représentés dans la figure 2.1 permettent de calculer la vitesse de corrosion dans chaque circuit. Les images illustrent le degré de corrosion dans chaque éprouvette.

			Les plaques après immersion	
Circuits	N° de l'éprouvette	Les plaques avant immersion	Avant nettoyage	Après nettoyage
Circuit direct aciérie	3155 (acier)			
Circuit indirect aciérie	2796 (acier)			
Circuit direct laminoir	3142 (acier)			

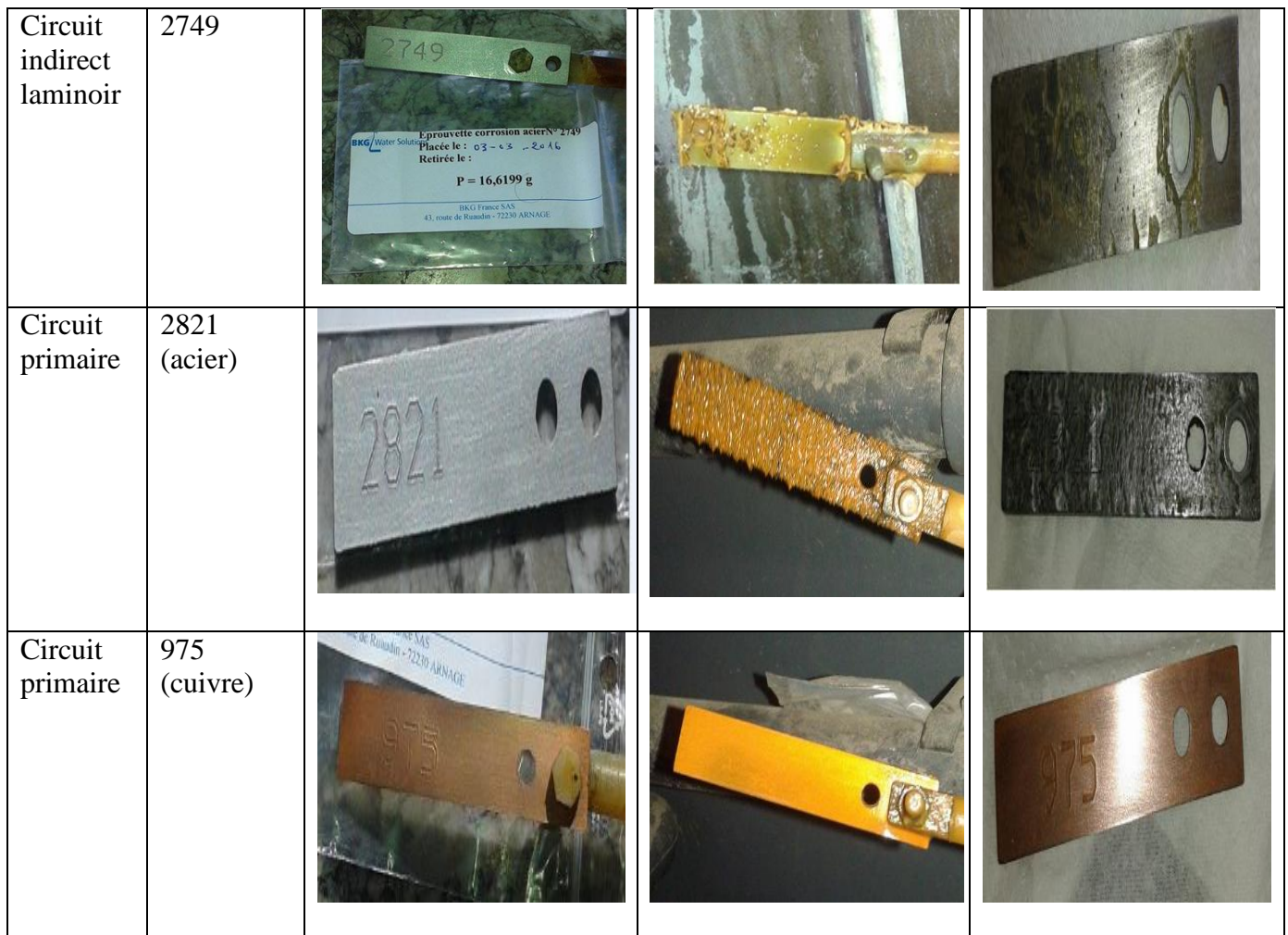


Figure 2.1 : l'état des éprouvettes avant et après

Tableau 2.1 : les résultats de la méthode « mise en place des éprouvettes »

N° de l'éprouvette de corrosion	Type	M1 en (mg) avant 32 jours	Circuit		M2 en (mg) après 32 jours	Δm (mg)	V (mg/h.cm ²)	V en MPY
			Laminoir	Acierie				
2821	Acier	1660,59		Primaire (fermé)	1525,80	134,79	0,0068	2,99
3155	Acier	1703,66		Secondaire	1555,41	148,25	0,0075	3,29
975	Cuivre	1889,95		Primaire	1888,83	1,12	5,69E-05	0,02
3142	Acier	1690,80	Secondaire (direct)		1606,16	84,64	0,0043	1,89
2796	Acier	1649,65		Tertiaire	1614,96	34,69	0,0018	0,79
2749	Acier	1661,99	Tertiaire (indirect)		1621,85	40,14	0,0020	0,88

Avec : V en MPY = V en mg/cm².h *439,2

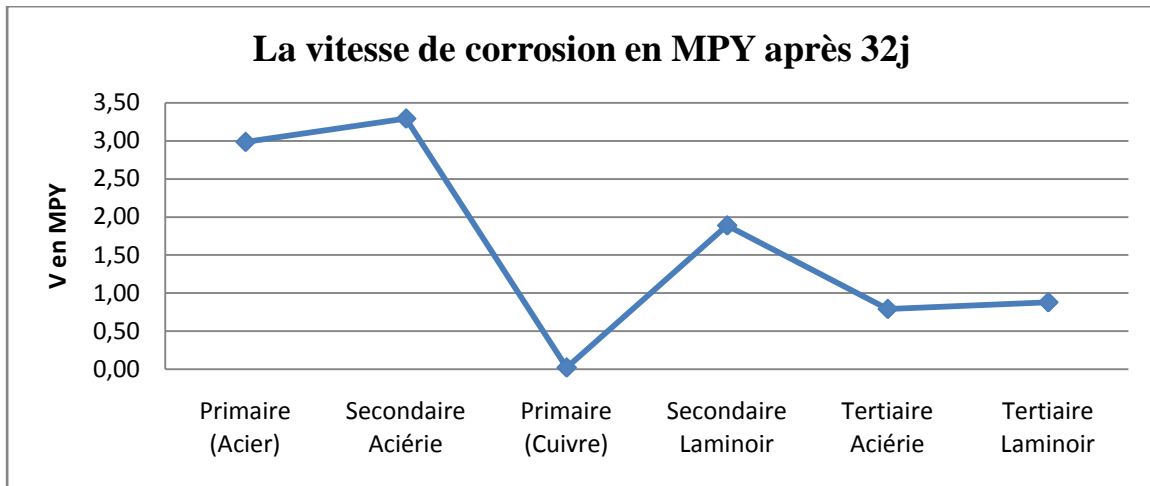


Figure 2.2 : la vitesse de corrosion dans les circuits de refroidissement

La vitesse de corrosion diffère largement d'un circuit à l'autre (figure 2.2). Pour continuer le suivi, on a immergé de nouveau les éprouvettes dans les circuits pour évaluer la variation de la vitesse dans chaque circuit en fonction du temps (figure 2.3).

Parallèlement, on s'est penché sur l'analyse de la quantité d'inhibiteur qui existe dans chaque circuit à l'aide de test des polyamines puisque l'inhibiteur est le CETAMINE « une technologie basée sur les polyamines filmantes pour le traitement global des eaux ».

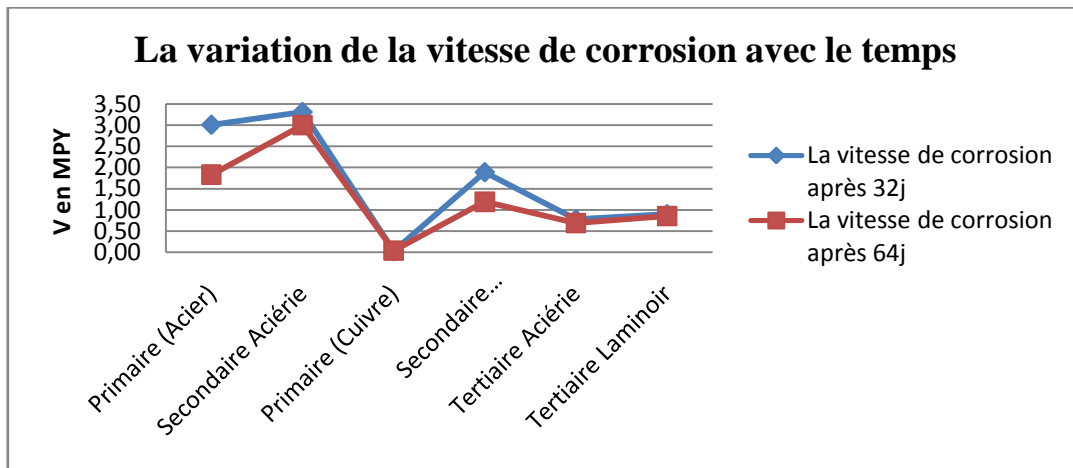


Figure 2.3 : la variation de la vitesse de corrosion avec le temps.

On remarque d'après cette figure que la vitesse de corrosion a diminué avec le temps, pendant 32 jours, la dégradation des plaques de corrosion était plus forte que pendant 64 jours, ce qui peut être expliqué par la diminution de l'action de certains agents agressifs tels que la teneur en oxygène dissous ou bien l'augmentation du pH.

3.1.1 Analyse qualitative quantitative de l'inhibiteur :

Pour un objectif spécifique d'étude de la situation, on a essayé de savoir la quantité de l'inhibiteur dans chaque circuit de refroidissement. L'analyse adoptée se fait comme suit :

Les réactifs :

- ✓ Polyamin-test reagenz A
- ✓ Polyamin-test reagenz B
- ✓ Polyamin-test reagenz C
- ✓ Polyamin-test V15/V30 (réactif titrant)

Le test des amines se subdivise en deux parties, on l'effectue de la manière suivante :

➤ Première partie :

- 1- On remplit l'éprouvette jusqu'au trait de jauge avec l'échantillon d'eau à analyser.
- 2- On ajoute le réactif C jusqu'à ce que le fond soit bien recouvert (25 gouttes env.).
- 3- On ajoute 2 gouttes de réactif A et 2 gouttes de réactif B.
- 4- On ferme l'éprouvette au moyen du bouchon à vis et on agite fortement.
- 5- Puis on attend que la solution contenue dans l'éprouvette se sépare en deux couches.

Couche inférieure incolore : il n'y a pas de polyamines dans l'eau.

Couche inférieure bleue : il y a des polyamines dans l'eau.

➤ Deuxième partie (si la couche inférieure est bleue)

- 1- On remplit la pipette de mesure jusqu'à la marque supérieure avec la solution de titrage (Polyamin-test V15/V30) contenue dans la bouteille de réserve.
- 2- On débouche l'éprouvette et on ajoute la solution contenue dans la pipette lentement et par petites portions en appuyant sur le piston.
- 3- Après chaque ajout de solution on referme l'éprouvette, on agite fortement et on attend que la couche inférieure se sépare.
- 4- on ajoute la solution par portions jusqu'à ce qu'un virage de couleur de bleu à rose pâle se produise au fond de la pipette, ce virage indique la fin du titrage.
- 5- La teneur en polyamines en mg/l (ou en ppm) se lit sur la graduation de la pipette de mesure, à hauteur du côté inférieur du segment de piston noir.

Les résultats de test des amines dans chaque circuit de refroidissement sont représentés ci-dessous :

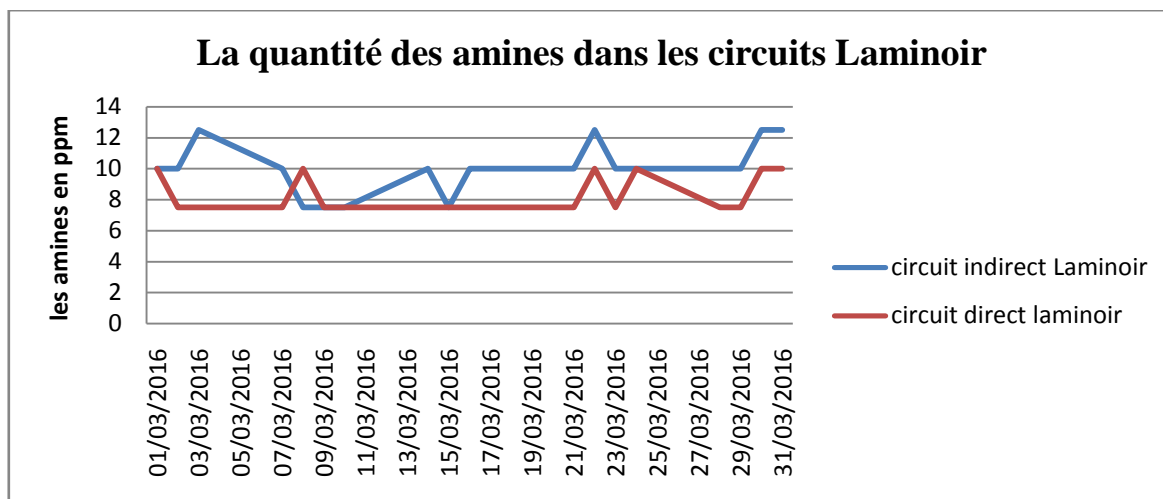


Figure 2.4 : la quantité des amines dans les circuits Laminoir

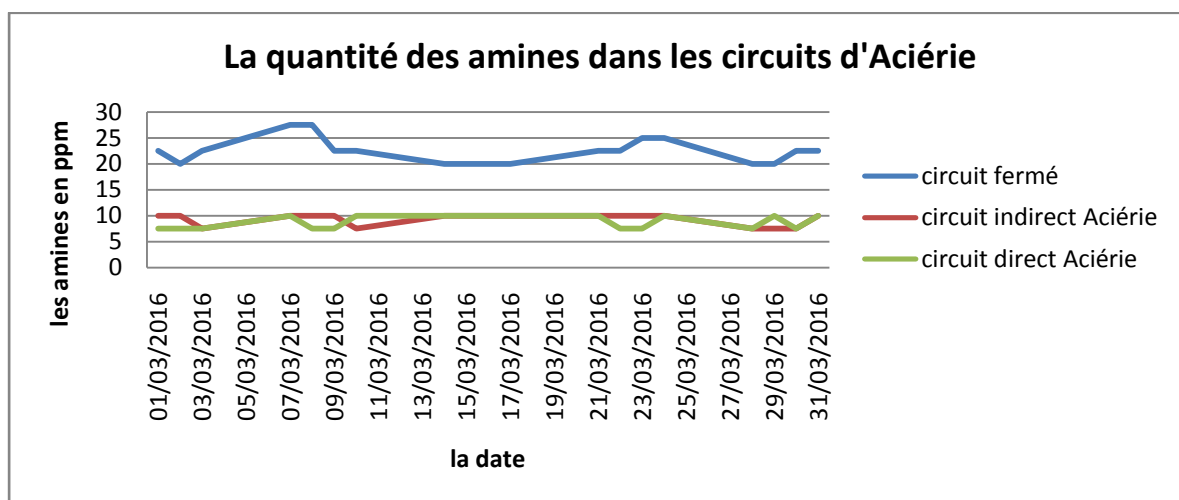


Figure 2.5 : la quantité des amines dans les circuits d'Acérie

D'après le test des amines on constate que l'inhibiteur existe dans tous les circuits ce qui signifie que l'injection s'est passée dans les normes (surtout le circuit fermé qui contient une grande quantité d'inhibiteur), mais l'état des éprouvettes de corrosion signifie que la corrosion est assez présente dans tous les circuits avec une variation d'un circuit à un autre, ceci nous conduit à l'évaluation de l'efficacité de l'inhibiteur.

3.1.2 L'efficacité de l'inhibiteur :

Pour effectuer le calcul de l'efficacité de l'inhibiteur (CETAMINE), on a immergé pendant 720 heures deux éprouvettes ($S = 25,625 \text{ cm}^2$) de corrosion en acier dans deux solutions préparées dans les mêmes conditions ($T = 23,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma = 193,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$), l'une avec inhibiteur (1ml de CETAMINE) l'autre sans inhibiteur.

Afin de calculer l'efficacité de ce dernier, les vitesses de corrosion sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 2.2 : la vitesse de corrosion avec et sans inhibiteur

	N°d'éprouvette	m ₀ (mg)	m _f (mg)	Δm (mg)	V (mg/cm ² .h)	V (MPY)
Avec inhibiteur	3107	1698,62	1693,67	4,95	0,00027	0,1185
Sans inhibiteur	2764	1675,2	1668,53	6,67	0,00036	0,1581

D'innombrables façons sont plausibles pour effectuer le calcul de l'efficacité de l'inhibiteur ou encore d'une formulation inhibitrice, en général, deux étapes priment lors de cette opération de calcul, qui sont donc : d'abord le calcul du taux de l'inhibition, ensuite, celui du coefficient d'inhibition :

- Le taux d'inhibition, le plus souvent utilisé :

$$\% \tau = \frac{V_0 - V}{V_0} * 100 = \frac{0,1581 - 0,1185}{0,1581} * 100 = 25,04\%$$

Où V₀ est la vitesse de la corrosion en l'absence d'inhibiteur, et V en présence d'inhibiteur ;

- Le coefficient d'inhibition :

$$\gamma = \frac{V_0}{V} = \frac{0,1581}{0,1185} = 1,33$$

Suite au calcul effectué, ainsi qu'à l'état des éprouvettes de corrosion après l'immersion dans les circuits de refroidissement, on constate que l'efficacité de l'inhibiteur est très minime voire très faible.

3.2 Mesure électrique de la vitesse de corrosion :

La mesure électrique de la vitesse de corrosion se fait par « Le Corrater » qui est un appareil portable compact et autonome permettant la lecture sur site de toutes les sondes de types Corrater. Il permet de mesurer la vitesse de corrosion, l'indice de piqûre, la conductivité et la température. Le principe de la mesure par polarisation linéaire consiste principalement à appliquer une faible différence de potentiel entre deux électrodes et à mesurer le courant résultant, qui est proportionnel à la vitesse de corrosion, L'unité choisie (μ/an ou MPY).

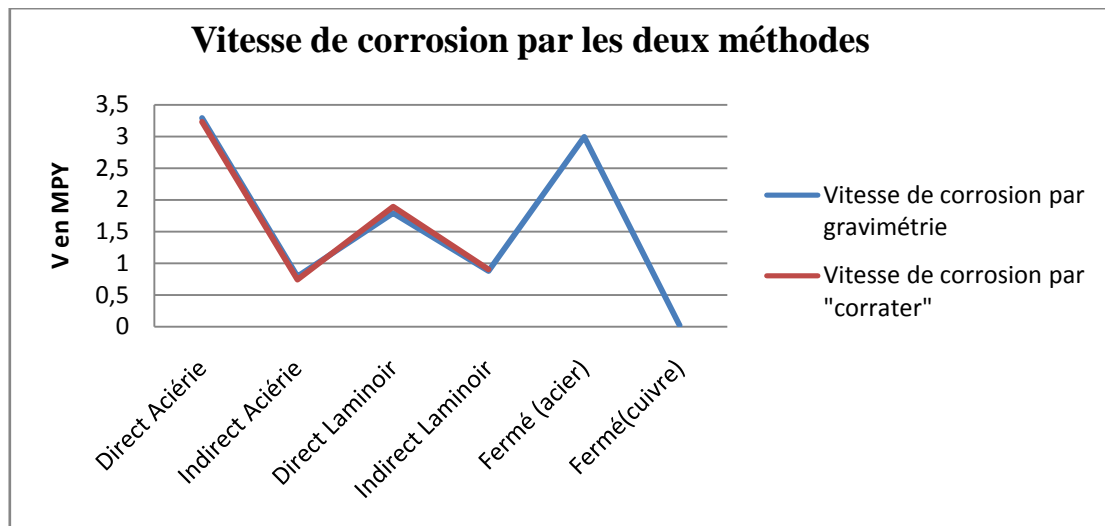


Figure 2.6 : la vitesse de corrosion en MPY par les deux méthodes

On remarque d'après la figure 2.6 qu'il y a une grande compatibilité entre les valeurs de la vitesse de corrosion par « Corrater » et la méthode gravimétrique, il faut signaler aussi que la valeur du circuit fermé n'existe pas dans le graphe parce qu'on n'a pas la sonde de mesure dans le circuit.

4. Protection et lutte contre la corrosion :

La corrosion est un phénomène qui dépend du matériau utilisé, de la conception de la pièce (forme, traitement, assemblage) et de l'environnement, il est donc primordial de signaler qu'il existe certaines solutions permettant la lutte ou la protection contre la corrosion, on propose entre autres :

- 📁 Changement du matériau : La première idée est de choisir un matériau qui ne se corrode pas ou du moins qui se corrode moins vite dans les milieux aqueux. On peut utiliser des aciers dits inoxydables, des aluminiums, des céramiques, des polymères.
- 📁 On peut toutefois protéger l'acier contre la corrosion par le biais de l'utilisation de ces deux moyens qui empêchent la réaction chimique d'oxydation d'avoir lieu :

- ✓ Réaliser une protection physique cela consiste à isoler le métal du milieu corrosif par son revêtement : Il s'agit dans ce cas de le couvrir complètement par une couche de peinture ou de matière plastique.
- ✓ Protéger par un moyen chimique: la protection cathodique, elle consiste à perturber la réaction d'oxydo-réduction (principe de l'anode sacrificielle), cette nouvelle pièce (souvent en zinc) va se corroder à la place de l'acier à protéger, puisque la réaction chimique entre l'environnement et la pièce sacrificielle empêche la réaction entre l'environnement et la pièce (l'acier) utile.

📄 Protection par inhibiteurs : dans notre situation, il convient de changer l'inhibiteur par un autre, beaucoup plus efficace à faible concentration, qui nous octroie un abaissement de la vitesse de corrosion des circuits de refroidissement, sans affecter ses caractéristiques physicochimiques. Il doit aussi être stable en présence des autres constituants du milieu et dans le domaine de son utilisation, cela est fait évidemment dans un objectif précis, celui de la minimisation des coûts du traitement chimique des circuits. Il y a plusieurs inhibiteurs qu'on peut utiliser afin de trouver le plus efficace à une faible quantité, on va citer deux parmi ces inhibiteurs, qui est :

✚ Inhibiteur à base des acides carboxyliques :

Le plus simple et le plus connu de ce type d'inhibiteurs est le benzoate de sodium ($C_6H_5-COONa$), il est très efficace pour les aciers, Il a l'avantage de n'être pas dangereux (corrosion localisée) s'il est utilisé à très faible concentration, il ne présente pas de toxicité apparente [18, 19].

✚ Les inhibiteurs combinés :

- ✓ Inhibiteur à base de groupements amines et des acides carboxyliques : présentent des pouvoirs protecteurs satisfaisants dans les circuits de refroidissement, notamment en raison de leur faible toxicité vis-à-vis de l'environnement.
- ✓ Un inhibiteur de corrosion contenant un acide carboxylique et ses sels solubles dans l'eau avec du zinc. cet inhibiteur pouvant être utilisé pour inhiber la corrosion sur des conduites en acier au carbone et des échangeurs de chaleur utilisés avec l'eau de refroidissement industrielle. L'effet résultant de la combinaison de l'acide carboxylique avec de très petites quantités de Zn permet d'obtenir un produit possédant de bonnes propriétés d'inhibition de corrosion qui est plus respectueux de l'environnement, en particulier lorsqu'il est destiné à être utilisé dans les applications d'eau de refroidissement.

📄 On propose également un traitement par l'ozone : L'ozone est adapté au traitement des eaux présentes dans les circuits de refroidissement fermés et ouverts, en tant qu'agent de désinfection le plus puissant utilisé dans le traitement de l'eau. Une efficacité élevée est garantie pour chaque valeur de pH. Son plus grand avantage est qu'il ne produit aucun sous-produit indésirable, il permet de contrôler trois aspects en même temps (la corrosion, l'entartrage, le développement microbiologique).

Chapitre 3 :

Les cartes de contrôle aux mesures de Shewhart pour la station de traitement des eaux

Il existe une variabilité dans tout le processus de production, l'objectif de tout industriel est que cette « variabilité naturelle » demeure dans des bornes acceptables. C'est une préoccupation majeure dans l'amélioration de la qualité industrielle. Un des outils utilisés pour tendre vers cette qualité est la Maîtrise Statistique des Processus (MSP).

La Maîtrise Statistique des Processus a pour but de mettre en place des outils statistiques de surveillance des processus de fabrication. L'outil de base de la MSP que nous étudierons est la carte de contrôle.

1. Nature des cartes de contrôle :

Il existe deux types de carte de contrôle :

- **Les cartes de contrôle aux mesures (tendance, dispersion) :** permettent de suivre une caractéristique mesurable de fonctionnement d'un équipement de façon continue par exemple une dimension, un poids...
- **Les cartes de contrôle aux attributs (nombre, proportion) :** qui permet de suivre une caractéristique non mesurable ou contrôlée à l'aide de calibres par exemple un contrôle visuel (destinées à surveiller la qualité de la production de façon plus grossière : conformité ou non conformité, nombre de défauts).[14]

Dans notre travail on va s'intéresser aux cartes de contrôle, aux mesures et plus précisément à la carte $\frac{\bar{x}}{R}$ vu que ces derniers se subdivisent en trois types.

- ✓ La carte $\frac{\bar{x}}{R}$ où \bar{x} est la moyenne arithmétique et R l'étendue,
- ✓ La carte $\frac{Me}{R}$ où Me est la médiane et R l'étendue,
- ✓ La carte $\frac{\bar{x}}{S}$ où \bar{x} est la moyenne, S est l'écart-type.

2. Cartes (\bar{x} ; R) pour les équipements de la station de traitement des eaux :

 **Carte de contrôle de la moyenne : carte \bar{x}**

Constituée d'une ligne centrale correspondant à la valeur $LC = \mu$, et de deux lignes de contrôle correspondant respectivement aux limites supérieures (LSC) et inférieures de contrôle (LIC).

Dans toute carte de contrôle de Shewhart, les limites de contrôle ont un écart à la moyenne μ égal à $A_2 * \bar{R}$ pour des échantillons de taille n on a donc :

$$LC = \mu \qquad LSC = \mu + A_2 \bar{R} \qquad LIC = LSC = \mu - A_2 \bar{R}$$

Pour obtenir les valeurs de A_2 , il suffit de se reporter à la table donnée en annexe 2.1.

Carte de contrôle de l'étendue : carte R

On souhaite ici visualiser, mettre en évidence, les variations de l'étendue. La conception de la carte de Shewhart de l'étendue, pour la phase I, utilise des coefficients : D_3 ; D_4 , dépendant de la taille n des échantillons.

Pour cette carte on a :

$$LC = \bar{R} \qquad LSC = D_4 \bar{R} \qquad LIC = D_3 \bar{R}$$

L'objectif d'une carte de contrôle aux mesures est de détecter la présence de causes assignables de dérèglement du processus de production. Le fondement théorique de conception des cartes de contrôle aux mesures est que le caractère numérique étudié est réparti dans la population, dans l'ensemble de la production, suivant une loi normale.

Test de normalité :

Donc avant d'élaborer une carte de contrôle, il faut faire un test de normalité dans l'objectif de savoir si on peut considérer les mesures représentant la population sur laquelle le caractère mesuré est une variable aléatoire qui suit une loi normale.

Il y a plusieurs tests qui permettent de vérifier la normalité d'une population, on se sert du test de Shapiro et Wilk pour un principe, bien clair, qui se structure comme suit :

On formule les deux hypothèses suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0 : \text{les données } x_i \text{ forment une distribution qui n'est significativement différente d'une loi normale.} \\ H_1 : \text{la distribution est significativement différente d'une loi normale.} \end{array} \right.$$

Le test est fondé sur :

- Le calcul d'une quantité notée Wobs
- La comparaison de cette Wobs, pour un risque donné, à une valeur $W\alpha$

$W\alpha$ sera lu sur la table de Shapiro et Wilk (voir Table de Shapiro et Wilk, Annexe 2.2)

Wobs est calculé de la manière suivante :

$$Wobs = \frac{(\sum_{j=1}^p a_j d_j)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Avec :

\bar{x} : Moyenne des mesures

a_j : des coefficients lus sur la table des coefficients, pour n donnée

d_j : des différences entre les mesures.

La comparaison est faite selon la règle de décision suivante :

- ❖ Si $W_{obs} > W(\alpha, n)$: on accepte l'hypothèse H_0 de normalité.
- ❖ Si $W_{obs} \leq W(\alpha, n)$: on rejette l'hypothèse H_0 de normalité

2.1 Cartes de contrôle (\bar{x} ; R) pour les filtres à sable :

La filtration fait aujourd'hui l'objet de nombreux développements technologiques et apparaît de plus en plus au centre de problématiques scientifiques, signe de l'émergence d'une prise de conscience que la maîtrise de ce procédé est importante pour que le traitement des eaux soit réussi.

Un filtre à sable est employé comme filtration de recirculation sur les circuits il comprend un corps vertical cylindrique de 3,8 m de diamètre, avec un fond et un sommet convexes et une plaque avec des gicleurs de drainage. Le matériel de filtration comprend deux couches de quartz à grain fin.

Les dimensions des filtres permettent d'obtenir un taux de filtration de $35 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ et une eau filtrée avec une quantité de matière solide en suspension max de 10 mg/l. l'eau filtrée est renvoyée au système de refroidissement.

2.1.1 Carte de contrôle pour filtre à sable Laminoir :

La réalisation du test de normalité pour le filtre à sable avant lavage :

Avant l'élaboration de la carte de contrôle de filtre à sable (afin de surveiller le fonctionnement de ce dernier), on vérifie d'abord la normalité de la série de mesure , le paramètre qui nous a permis d'avoir une idée sur la vitesse de filtration et s'assurer s'il y a un colmatage ou bien l'opération de filtration ne passe pas dans les conditions souhaitables est la différence de pression de l'entrée et sortie du filtre, le test est fait comme suit :

- ✓ On désire tester la normalité d'une population correspondant aux mesures (ΔP en bar) suivantes :

0,39 ; 0,51 ; 0,55 ; 0,72 ; 0,68 ; 0,6 ; 0,46

- ✓ On classe les données par ordre croissant :

$0,39 < 0,46 < 0,51 < 0,55 < 0,6 < 0,68 < 0,72$

- ✓ On calcule les différences d_1, d_2, d_3

$d_1 = 0,72 - 0,39 = 0,33$

$d_2 = 0,68 - 0,46 = 0,22$ (7 mesures 3 différences, La médiane est ignorée)

$d_3 = 0,6 - 0,51 = 0,09$

- ✓ On calcule W_{obs} :

$$\bar{x} = \frac{\sum xi}{n} = \frac{3,91}{7} = 0,558 \text{ bar}$$

Pour $n = 7$:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = 0,6233 \\ a_2 = 0,3031 \\ a_3 = 0,1401 \end{array} \right.$$

Donc : $W_{obs} = \frac{(\sum_{j=1}^p a_j d_j)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,9774$

- ✓ On choisit un risque $\alpha = 5\%$ et on lit dans la table de Shapiro et Wilk la valeur de $W_{(5\%,7)}$, d'après la table : $W_{(5\%,7)} = 0,803$

Puisque $W_{obs} > W_{(5\%,7)}$ on accepte la normalité des mesures à la confiance de 5%.

2.1.1.1 Carte de contrôle ($\bar{x}; R$) pour filtre à sable avant lavage :

- ❖ Carte de contrôle de moyenne :

La construction de la carte de contrôle est faite de la manière suivante :

- ✓ On prélève 28 échantillons de taille 2.
- ✓ On calcule LC, LSC, LIC.

Tableau 3.1 : la pression différentielle du filtre à sable laminoir avant lavage

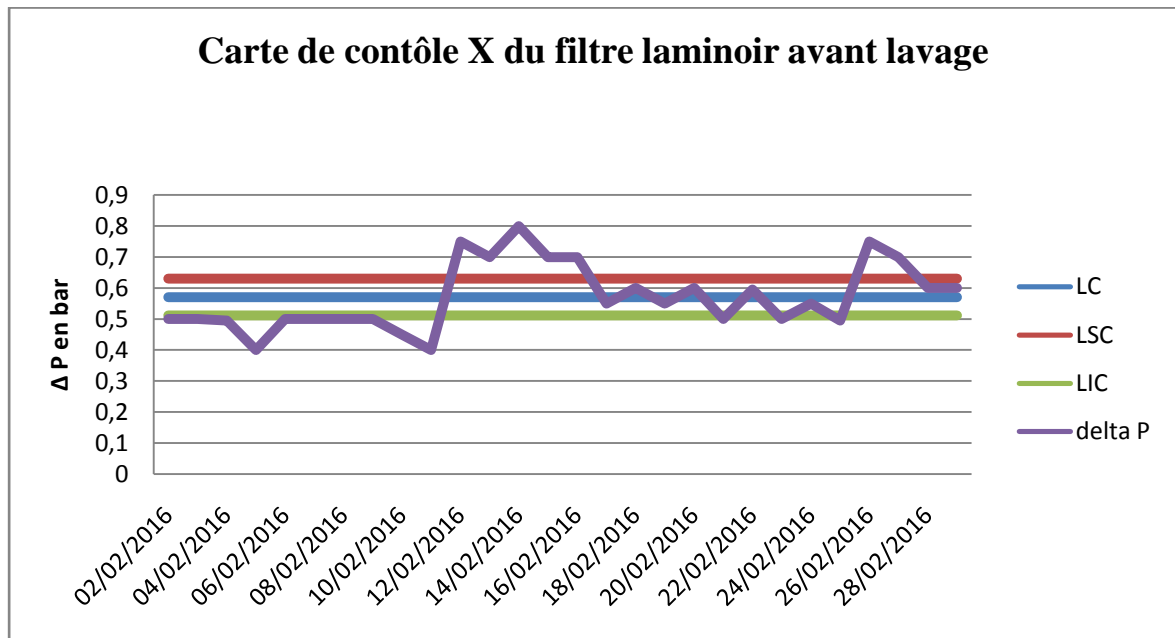
Date	X1 (ΔP_1)	X2 (ΔP_2)	Moyenne en bar	Etendue en bar
02/02/2016	0,499	0,501	0,5	0,002
03/02/2016	0,498	0,502	0,5	0,004
04/02/2016	0,51	0,48	0,495	0,03
05/02/2016	0,41	0,39	0,4	0,02
06/02/2016	0,51	0,49	0,5	0,02
07/02/2016	0,49	0,51	0,5	0,02
08/02/2016	0,55	0,45	0,5	0,1
09/02/2016	0,51	0,49	0,5	0,02
10/02/2016	0,44	0,46	0,45	0,02
11/02/2016	0,39	0,41	0,4	0,02
12/02/2016	0,74	0,76	0,75	0,02
13/02/2016	0,72	0,68	0,7	0,04
14/02/2016	0,799	0,801	0,8	0,002
15/02/2016	0,68	0,72	0,7	0,04
16/02/2016	0,67	0,73	0,7	0,06
17/02/2016	0,53	0,57	0,55	0,04
18/02/2016	0,6	0,6	0,6	0
19/02/2016	0,53	0,57	0,55	0,04
20/02/2016	0,57	0,63	0,6	0,06
21/02/2016	0,53	0,47	0,5	0,06
22/02/2016	0,6	0,59	0,595	0,01
23/02/2016	0,49	0,51	0,5	0,02
24/02/2016	0,54	0,56	0,55	0,02

25/02/2016	0,5	0,49	0,495	0,01
26/02/2016	0,77	0,73	0,75	0,04
27/02/2016	0,65	0,75	0,7	0,1
28/02/2016	0,62	0,58	0,6	0,04
29/02/2016	0,61	0,59	0,6	0,02

Avec : $\mu = 0,570892857 = LC$ bar

$$\left\{ \begin{array}{l} A_2 = 1,88 \\ \bar{R} = 0,031357143 \text{ bar} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} LSC = 0,629844286 \text{ bar} \\ LIC = 0,511941429 \text{ bar} \end{array} \right.$$

- ✓ On trace sur la carte de contrôle la ligne centrale et les lignes de contrôle.
- ✓ On porte sur la carte, pour $i=1, \dots, 28$, les points M_i de coordonnées $(i; \bar{x}_i)$, où \bar{x}_i désigne la moyenne du caractère étudié dans l'échantillon numéro i .



D'après cette carte de contrôle, on constate que les points M_i (la moyenne de différence de pression) sont situés en dehors des limites de contrôle, ce qui nous permet de déclarer que le processus est non maîtrisé avant lavage et ce résultat était envisagé vu que l'eau qui entre est encore chargée de la fine calamine et le fonctionnement en continu du filtre permet à la MES de se multiplier dans l'entrée du filtre ce qui nous conduit à un phénomène (colmatage) très dangereux qui peut détruire le matériel de filtration, et d'augmenter la pression différentielle et cela mène à la diminution du débit (le débit des refoulements s'est très affaibli et ne permet plus un mouvement d'eau suffisant vers le débordement) et de la vitesse de filtration, c'est

pour cela les filtres utilisés dans la station de traitement des eaux laminoir nécessitent un lavage journalier afin d'éviter le colmatage des filtres.

❖ Carte de contrôle de l'étendue :

On construit cette carte de la même manière que la carte \bar{x} la différence se manifeste dans les équations de LSC et LIC ainsi que LC est bien évidemment la moyenne des étendues :

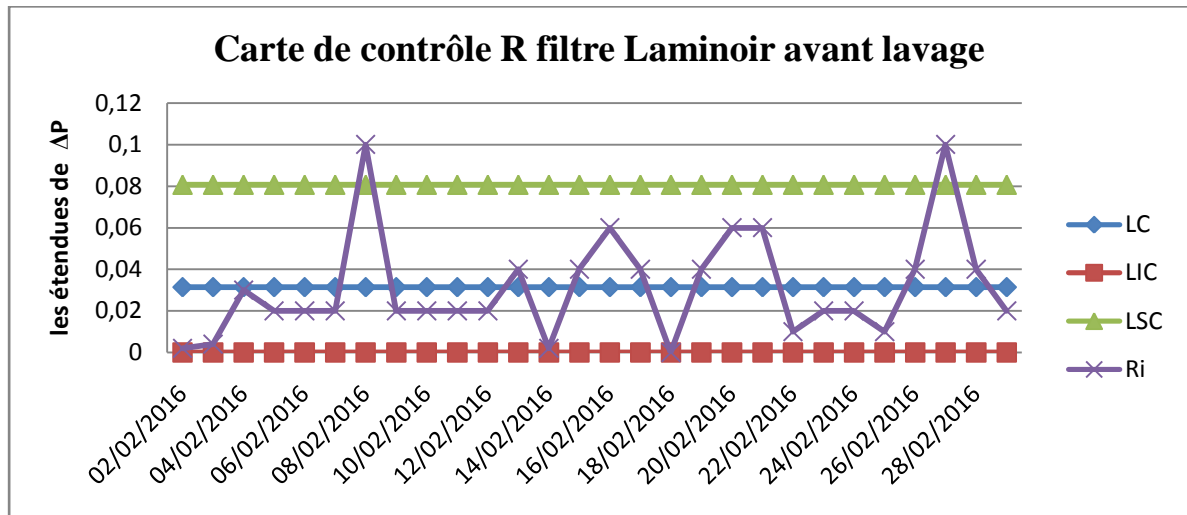


Figure 3.2 : Carte de contrôle R filtre 1 Laminoir avant lavage

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{R} = 0,031357143 \text{ bar} \\ D3 = 0 \\ D4 = 2,574 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} LC = 0,031357143 \text{ bar} \\ LIC = 0 \text{ bar} \\ LSC = 0,08071329 \text{ bar} \end{array} \right.$$

On remarque d'après cette figure que le processus est non maîtrisé vu que, les échantillons de 08/02/2016 et 27/02/2016 sont situés en dehors de la limite supérieure du contrôle, cela peut être revient à un changement d'équipe, de technicien sur une machine, du dérèglement d'une machine, une panne (défaillance de manomètre), ces causes sont probablement à l'origine d'un processus hors contrôle.

2.1.1.2 Carte de contrôle ($\bar{x}; R$) filtre à sable après lavage :

Afin de continuer le suivi du processus de filtration, on est censé voir si ce dernier est maîtrisé après lavage, on va donc élaborer une autre carte de contrôle pour le filtre 1 Laminoir mais cette fois-ci après lavage, et cela se ferait bien-sûr après la vérification pour savoir si la population suit une loi normale ou non, cette vérification se fait de la même manière que le filtre 1 avant lavage à l'aide du test de Shapiro et wilk:

✓ On désire tester la normalité d'une population correspondant aux mesures suivantes :

0,3 ; 0,35 ; 0,4 ; 0,48 ; 0,55 ; 0,58 ; 0,6

✓ On calcule Wobs :

$$Wobs = \frac{(\sum_{j=1}^p a_j d_j)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,9228 \quad ; \quad \text{Avec : } \bar{x} = 0,466$$

✓ Pour un risque $\alpha = 5\%$ et d'après la table de Shapiro et Wilk on a : $W_{(5\%,7)} = 0,803$

Puisque $Wobs > W_{(5\%,7)}$ on accepte l'hypothèse H_0 de normalité à la confiance de 5%.

❖ La construction de la carte de la moyenne du filtre 1 après lavage :

Les valeurs 28 échantillons pour une taille de $n=2$ sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.2: la pression différentielle du filtre à sable laminoir après lavage

date	X1(ΔP_1)	X2(ΔP_2)	Moyenne	Etendu (R)
02/02/2016	0,38	0,42	0,4	0,04
03/02/2016	0,37	0,43	0,4	0,06
04/02/2016	0,39	0,41	0,4	0,02
05/02/2016	0,28	0,32	0,3	0,04
06/02/2016	0,45	0,35	0,4	0,1
07/02/2016	0,29	0,31	0,3	0,02
08/02/2016	0,44	0,36	0,4	0,08
09/02/2016	0,39	0,41	0,4	0,02
10/02/2016	0,32	0,38	0,35	0,06
11/02/2016	0,34	0,36	0,35	0,02
12/02/2016	0,39	0,41	0,4	0,02
13/02/2016	0,27	0,33	0,3	0,06
14/02/2016	0,58	0,52	0,55	0,06
15/02/2016	0,55	0,65	0,6	0,1
16/02/2016	0,42	0,48	0,45	0,06
17/02/2016	0,27	0,33	0,3	0,06
18/02/2016	0,28	0,32	0,3	0,04
19/02/2016	0,31	0,29	0,3	0,02
20/02/2016	0,44	0,36	0,4	0,08
21/02/2016	0,43	0,37	0,4	0,06
22/02/2016	0,29	0,31	0,3	0,02
23/02/2016	0,31	0,29	0,3	0,02
24/02/2016	0,33	0,37	0,35	0,04
25/02/2016	0,42	0,31	0,4	0,11
26/02/2016	0,4	0,5	0,45	0,1
27/02/2016	0,55	0,45	0,5	0,1
28/02/2016	0,44	0,46	0,45	0,02
29/02/2016	0,33	0,47	0,4	0,14

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} LC = \mu = 0,3875 \text{ bar} \\ \bar{R} = 0,0560 ; A_2 = 1,88 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} LSC = 0,49166429 \text{ b} \\ LIC = 0,28083571 \text{ bar} \end{array} \right.$

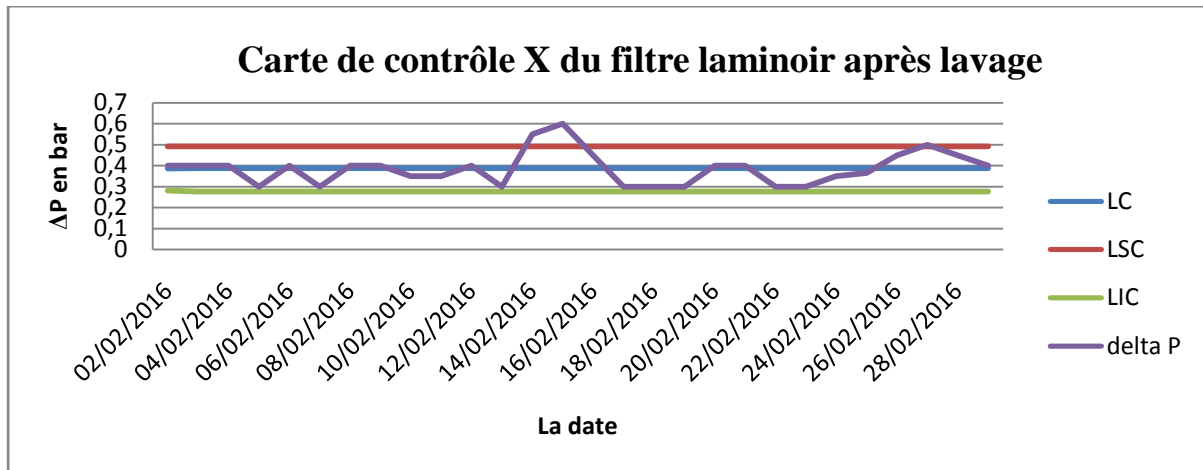


Figure 3.3 : Carte de contrôle X filtre Laminoir après lavage

Suivant la règle de décision des cartes de contrôle, ce processus est non maîtrisé puisqu'il contient deux points en dehors de la limite supérieure mais si on compare cette carte de contrôle avec celle du même filtre et dans les mêmes dates, on constate donc qu'avant lavage il y a une grande différence qui se situe au niveau de la diminution des points en dehors du contrôle de 16 à 2 grâce à un lavage journalier, concernant les deux points (14/02/2016 et 15/02/2016) on remarque que pour ces deux jours la pression différentielle était maximale avant lavage et après ce dernier la perte de pression était inférieure à 0,2 bar et dans ce cas le filtre est colmaté, ce colmatage est caractérisé par une mise en charge du réseau d'alimentation des filtre et/ou un défaut de nettoyage de ce dernier.

❖ Carte de contrôle de l'étendue après lavage:

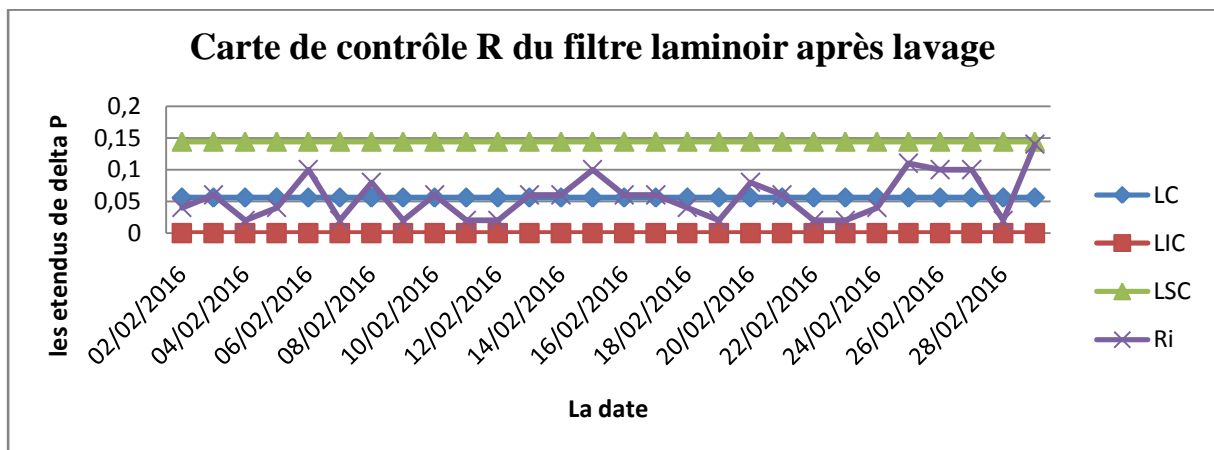


Figure 3.4: Carte de contrôle R filtre Laminoir après lavage

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{R} = LC = 0,05607143 \text{ bar} \\ D3 = 0 \\ D4 = 2,574 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} LIC = 0 \text{ bar} \\ LSC = 0,14432786 \text{ bar} \end{array} \right.$$

On remarque que les étendues sont sous contrôle puisque tous les points sont entre les limites.

2.1.2 Cartes de contrôle \bar{X} des filtres à sable Acierie :

a. Les filtres à sable du circuit direct :

Le circuit direct contient deux filtres à sable, dont le test de normalité (Shapiro et wilk) va être présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.3 : Test de normalité des filtres à sable de circuit direct

	Filtre1 (avant lavage)	Filtre1 (après lavage)	Filtre2 (avant lavage)	Filtre 2 (après lavage)
Série des mesures	0,56 ;0,63 ; 0,68 ; 0,71 ; 0,75 ; 0,8	0,34; 0,41; 0,45 ; 0,48; 0,51 ; 0,56	0,37 ; 0,44;0,51 ; 0,56;0,63 ; 0,7	0,32 ;0,38; 0,4 ; 0,44 ; 0,5 ; 0,56
Wobs	0,9907	0,9919	0,9878	0,9824
$W_{(5\%,6)}$	0,788	0,788	0,788	0,788
L'hypothèse H_0 de normalité acceptée si : $(W_{obs} > W_{(5\%,6)})$	Acceptée	Acceptée	Acceptée	Acceptée

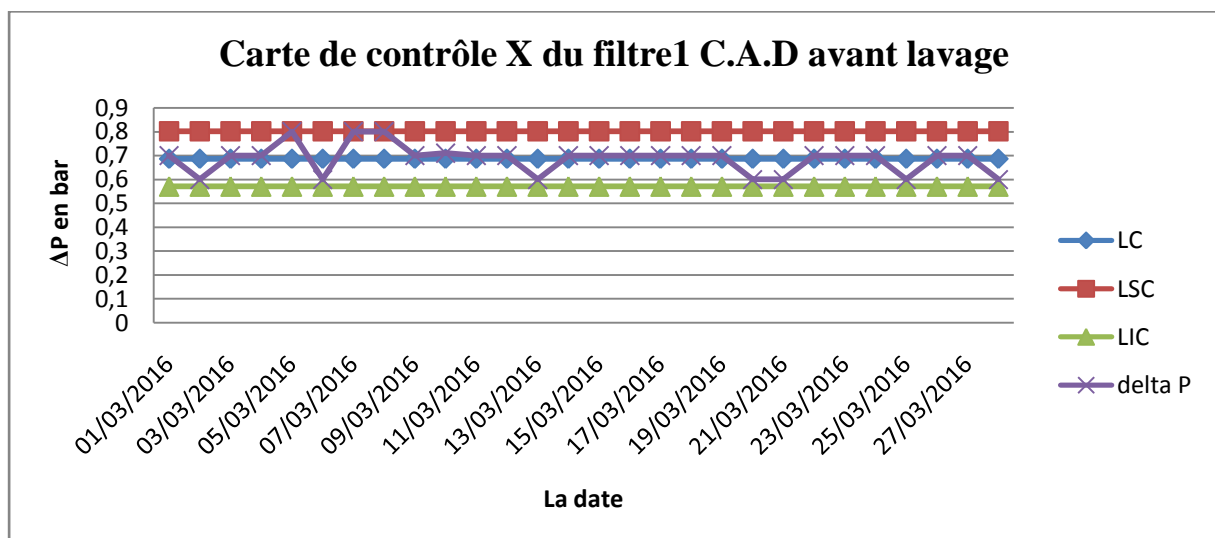


Figure 3.5: Carte de contrôle X du filtre1 C.A.D avant lavage

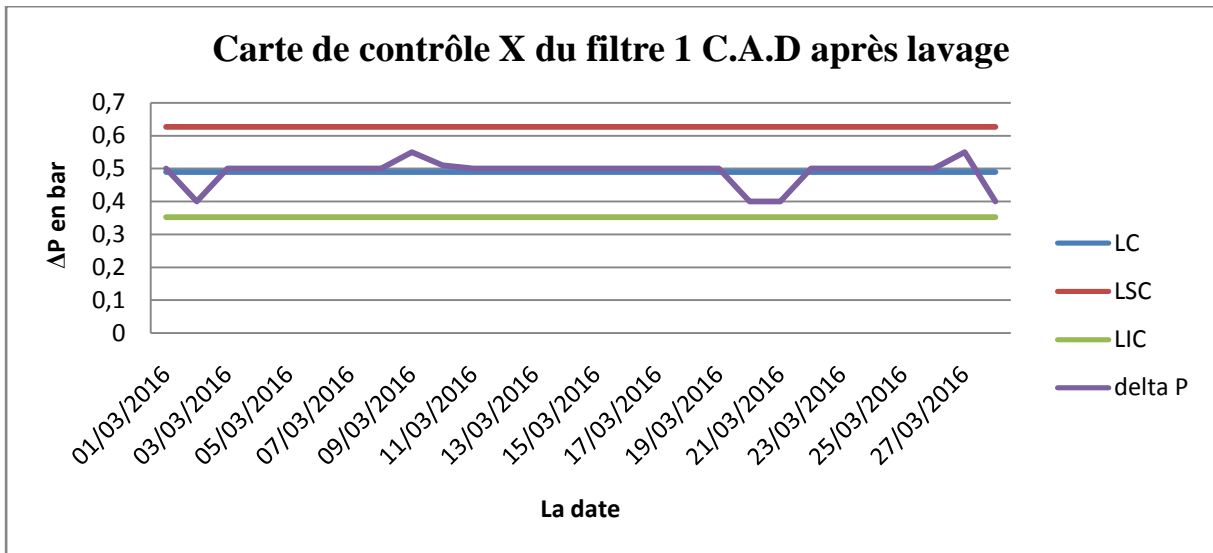


Figure 3.6 : Carte de contrôle X du filtre 1 C.A.D après lavage

D'après la carte de contrôle de filtre 1 A.D « avant et après lavage» on remarque, que tous les points sont entre les limites, ce qui montre que l'opération de filtration est sous contrôle grâce à un lavage adéquat qui permet de diminuer MES de 20 ppm à 1 ppm, et on a pu repérer également une perte de pression de 0,2 à 0,3 donc le filtre est nettoyé avant qu'il ne soit colmaté vu que parfois si on retarde le lavage, le filtre nécessite au minimum 2 heures pour le lavage et le séjour, ce qui est apparemment impossible car la station de traitement des eaux travaille selon la production de laminoir et d'Acierie donc stopper la production c'est une perte énorme pour l'entreprise.

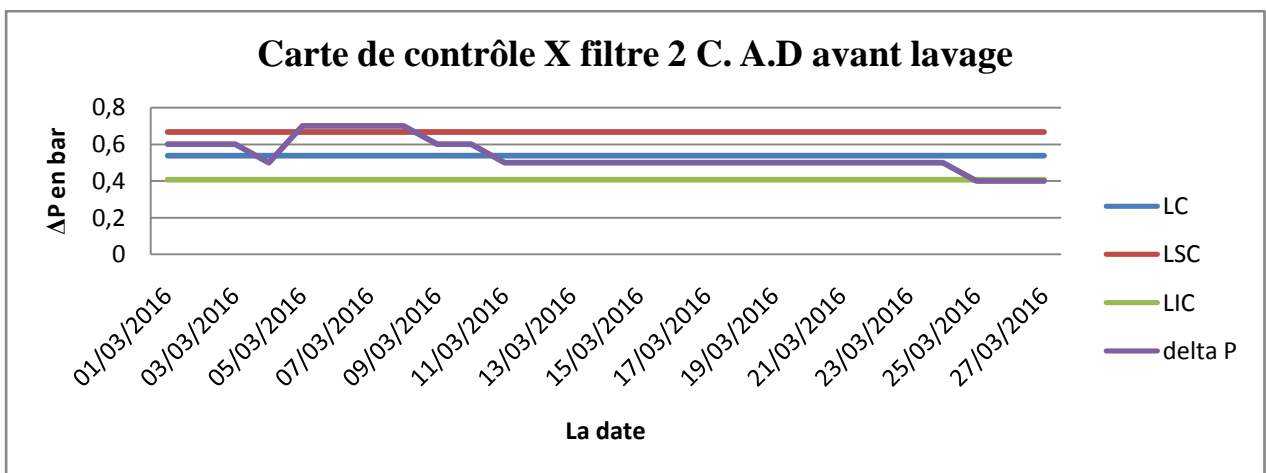


Figure 3.7 : Carte de contrôle X filtre 2 C. A.D avant lavage

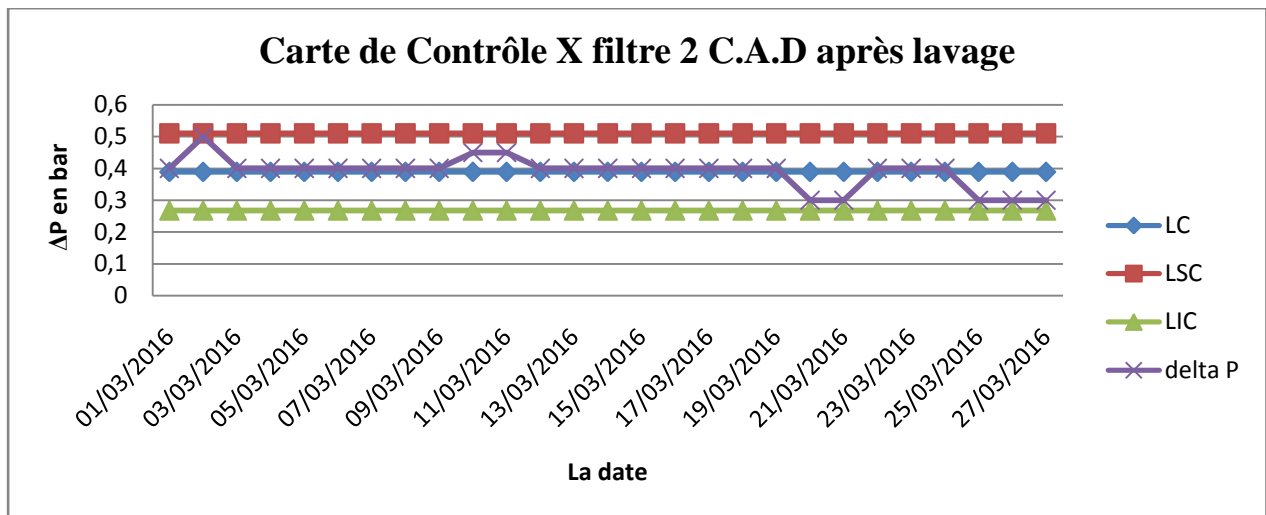


Figure 3.8 : Carte de Contrôle X filtre 2 C.A.D après lavage

Quant au filtre 2 A.D avant lavage, on constate la présence de deux points : (07/03/2016 et 08/03/2016) en dehors de la limite supérieure ; ceci est justifié peut être par un retard de lavage journalier ainsi que par l'accumulation de MES dans l'entrée du filtre. Cependant, on réalise que la pression différentielle après lavage est sous contrôle puisque cette dernière a diminué dans les deux points de 0,3 bar ce qui montre l'importance de lavage à temps.

b. Le filtre à sable de circuit indirect Acierie :

Ce filtre ne présente pas de problèmes lors de son fonctionnement vu qu'il est utilisé pour le circuit indirect qui est moins chargé, il est en plus isolé de l'enchaînement du traitement, il prend donc l'eau de bassin de stockage du circuit indirect et le filtre, juste après l'eau filtrée retourne dans le bassin donc il n'influence pas les équipements qui sont en amont du filtre, c'est pour cela qu'on trouve d'ailleurs dans ce dernier une grande différence (± 20 ppm) en MES (qui contient la poussière et/ou les tartres) et turbidité par rapport aux filtres des circuits directs (figures 3.8 et 3.9), son lavage se faisait auparavant une seule fois par mois, mais par souci d'amélioration du procédé de traitement des eaux, on a décidé de le laver une fois par semaine afin d'éviter le colmatage.

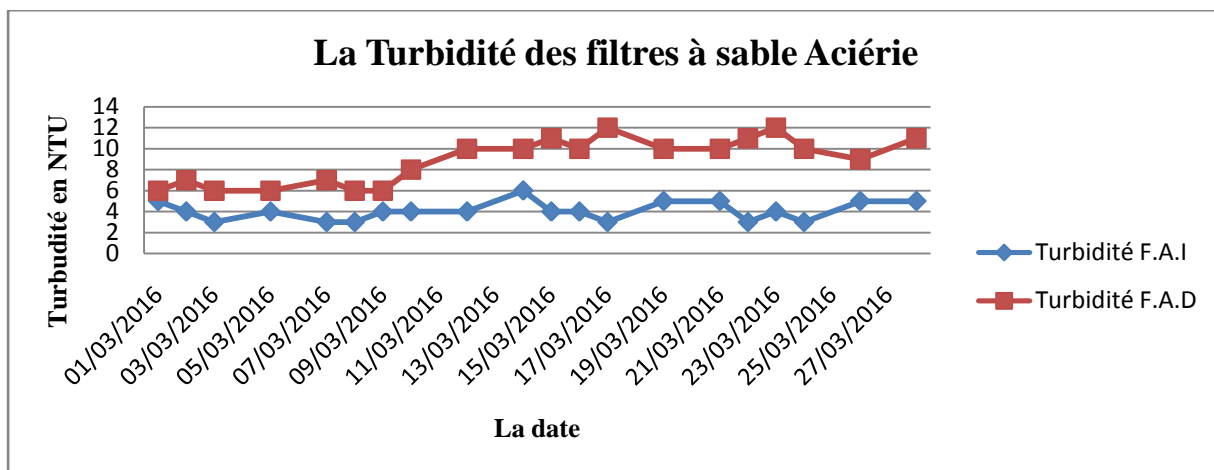


Figure 3.9 : La Turbidité des filtres à sable Acérie

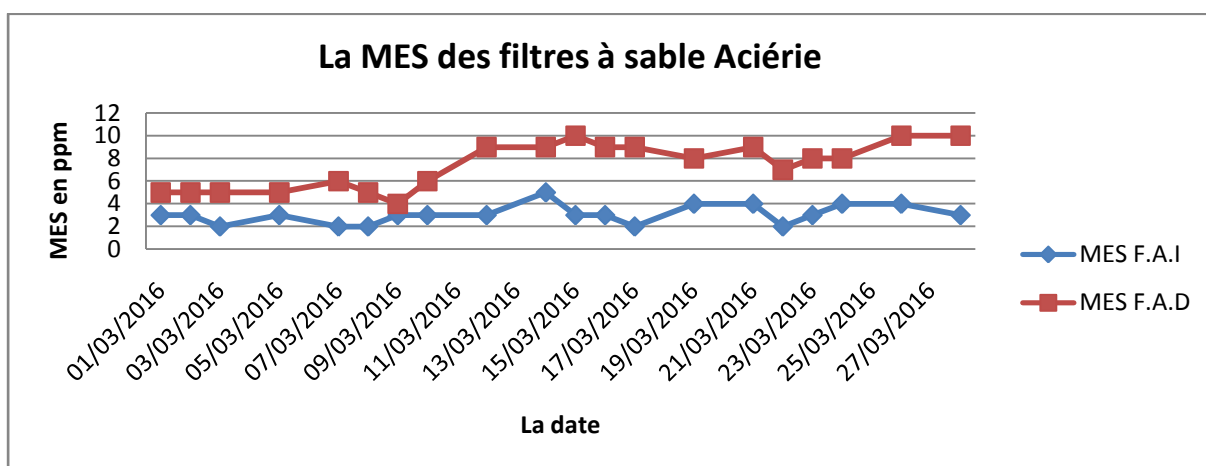


Figure 3.10 : La MES des filtres à sable Acérie

➤ Test de normalité pour le filtre à sable du circuit indirect :

Tableau 3.4 : Test de normalité de filtre à sable de circuit indirect

	Filtre C.I. avant lavage	Filtre C.I après lavage
Série des mesures	1,17 ; 1,27 ; 1,38 ; 1,56 ; 1,76 ; 1,92	0,65 ; 0,73 ; 0,76 ; 0,8 ; 0,88 ; 0,92
Wobs	1,2178	0,9768
$W_{(5\%,6)}$	0,788	0,788
L'hypothèse H_0 de normalité acceptée si : $(W_{obs} > W_{(5\%,6)})$	Acceptée	Acceptée

➤ Les cartes de contrôle de la moyenne de filtre à sable circuit indirect :

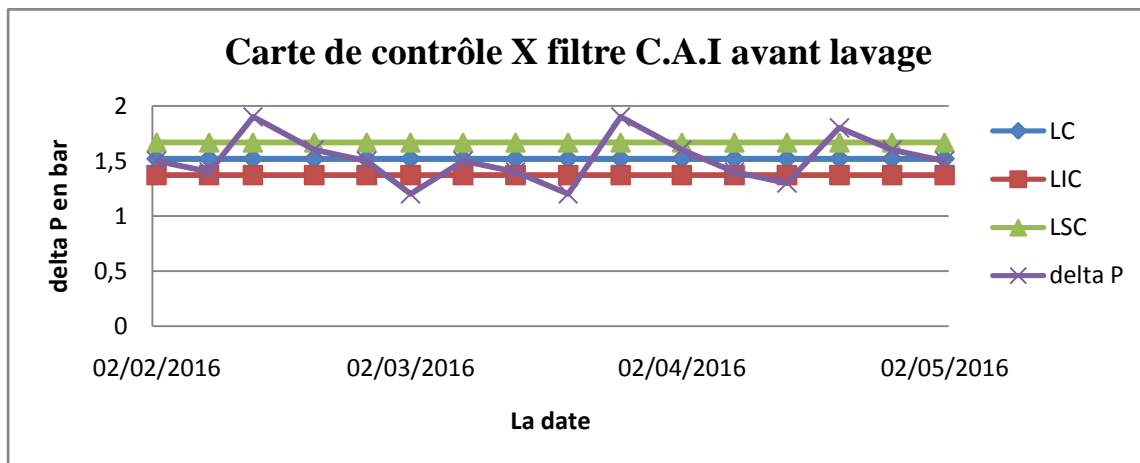


Figure 3.11 : Carte de contrôle X filtre C.A.I avant lavage

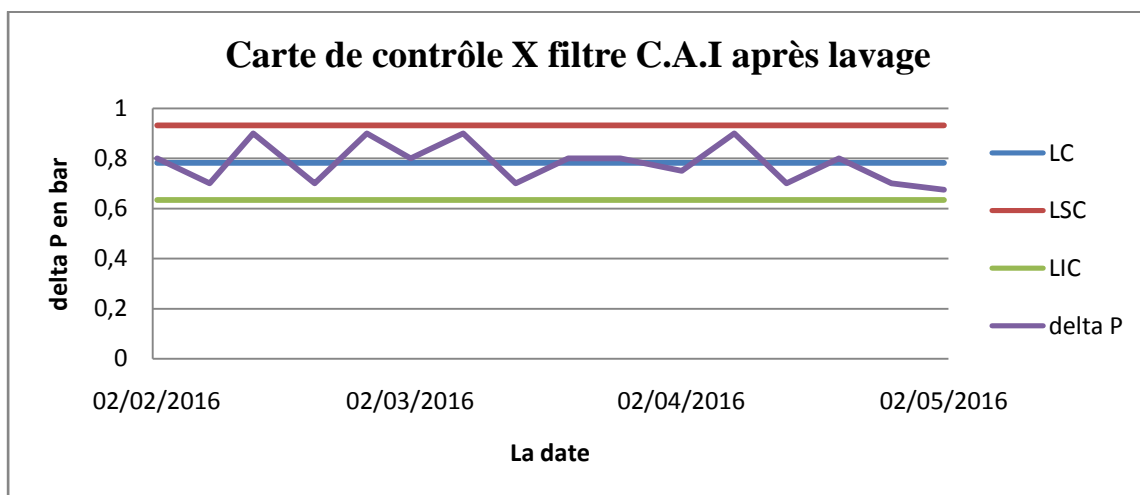


Figure 3.12 : Carte de contrôle X filtre C.A.I après lavage

2.1.3 Diagramme d'Ishikawa de colmatage des filtres de sable :

D'après ces cartes de contrôle on constate que pour avoir une bonne filtration ainsi qu'un processus maîtrisé, il est obligatoire d'éviter le maximum possible le colmatage du filtre qui peut détruire ces derniers. On procédera à l'élaboration du diagramme d'Ishikawa (figure 3.13) afin de nous permettre de déterminer les causes principales de ce problème.

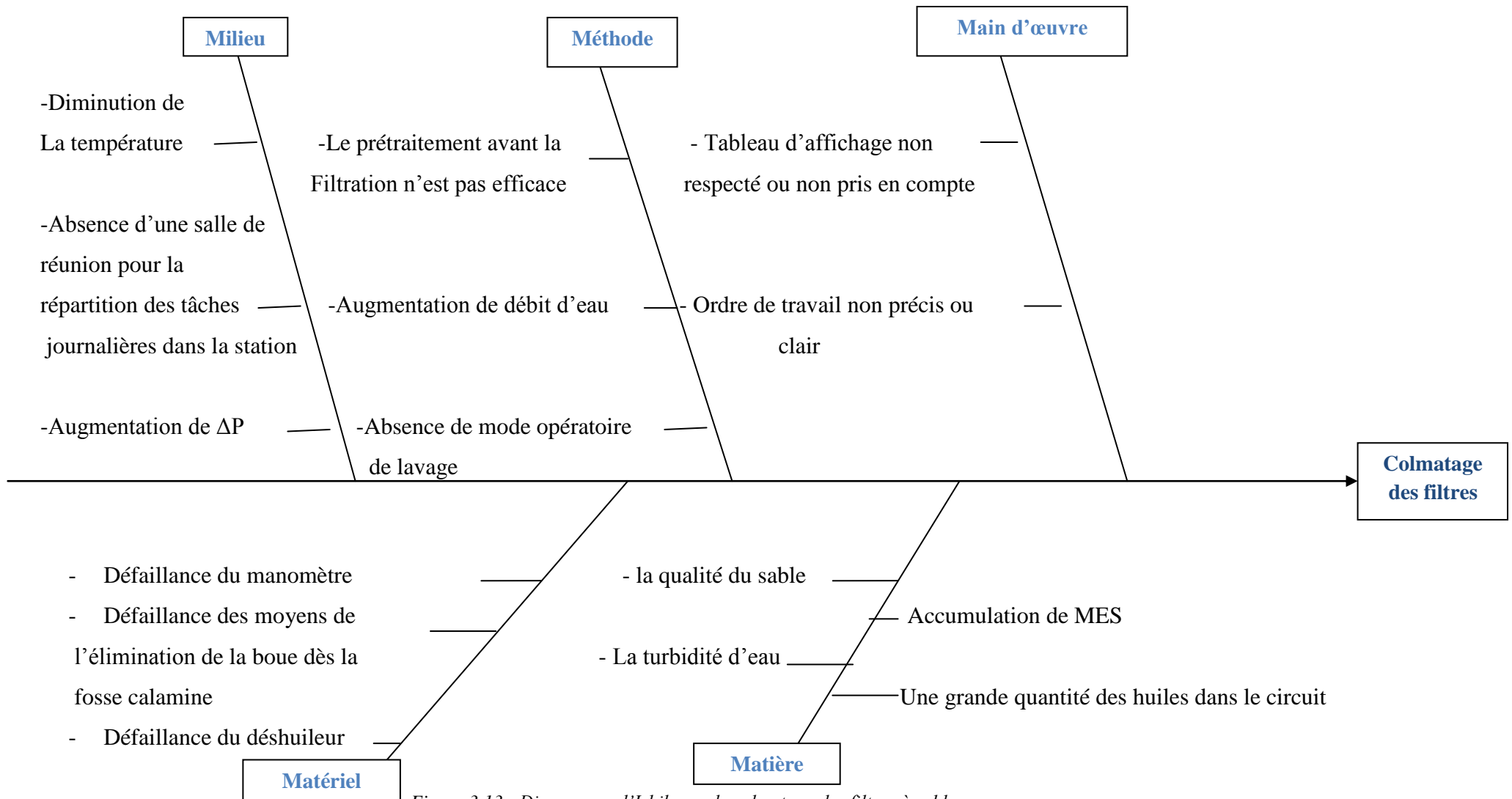


Figure 3.13 : Diagramme d'Ishikawa de colmatage des filtres à sable

Après la réalisation du diagramme d'Ishikawa de principales causes de la non maîtrise de l'opération de filtration, on a présenté le diagramme dans le tableau d'affichage de la salle de contrôle du procédé global de traitement des eaux, puis on a entamé une réunion avec l'équipe de la station de traitement des eaux afin d'identifier les causes qui peuvent être éliminées définitivement sans influencer le procédé de traitement, et les causes qui nécessitent une étude, on s'est tous mis d'accord à la fin de la réunion sur les points suivants: le changement du manomètre, la maintenance des moyens d'élimination de la boue dès la fosse calamine et déshuileur, ainsi que la réalisation d'un mode opératoire de lavage des filtres qui sera détaillé et affiché dans le tableau d'affichage, concernant la qualité de sable, on a décidé de mettre en œuvre les points abordés et approuvés par tout le monde par rapport aux autres causes pour voir s'il y aurait une éventuelle amélioration. Sinon, on demande le changement de sable malgré que cette opération soit très coûteuse.

2.2 Cartes de contrôles (\bar{x} ; R) pour l'osmose inverse :

L'osmoseur est l'un des équipements utilisés dans le traitement des eaux d'appoint. Nous comptons donc dans cette partie vérifier si le processus de séparation avec l'osmoseur est maîtrisé ou pas. Pour cela, il faut opter pour l'un des principaux paramètres qui déterminent les performances d'un système d'osmose inverse, ce paramètre est le taux de conversion, on est donc censé élaborer des cartes de contrôles de ce dernier, en voici la démarche :

- ✓ Une hypothèse H_0 de normalité acceptée puisqu'on a $W_{obs} = 0,935 > W_{(5\%,6)} = 0,788$
- ✓ Carte de contrôle R : $\bar{R} = 0,45$; LSC = 1,47 ; LIC = 0
- ✓ Carte de contrôle X : LC = 71,62 ; LSC = 73,31 ; LIC = 71,62

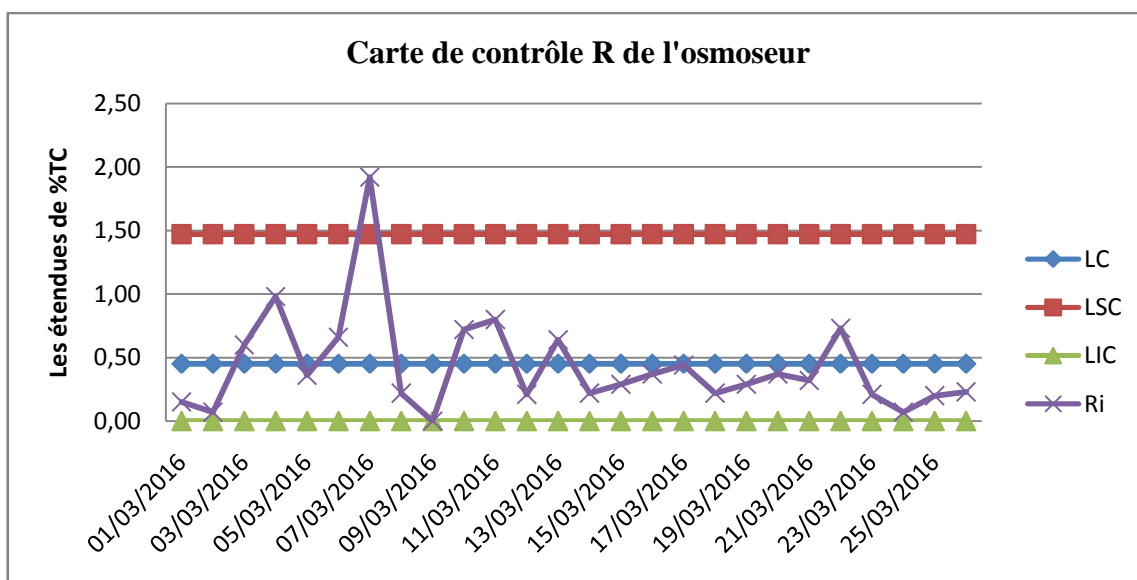


Figure 3.14 : carte de contrôle R de l'osmoseur

La carte de contrôle R contient un point (07/03/2016) en dehors de la limite supérieure, ceci nous conduit donc à déclarer que le processus est plutôt non maîtrisé, malgré que tous les autres points soient sous contrôle et autour de la moyenne des moyennes (LC). On peut justifier la non maîtrise du processus par les causes suivantes :

- ✓ Un échantillonnage au début du démarrage d'osmoseur ;
- ✓ La vanne de remplissage du bac de rinçage est ouverte;
- ✓ La température d'eau rentrée des filtres à cartouche est basse ;
- ✓ La pression de sortie du rejet est inférieure à 10 bar.

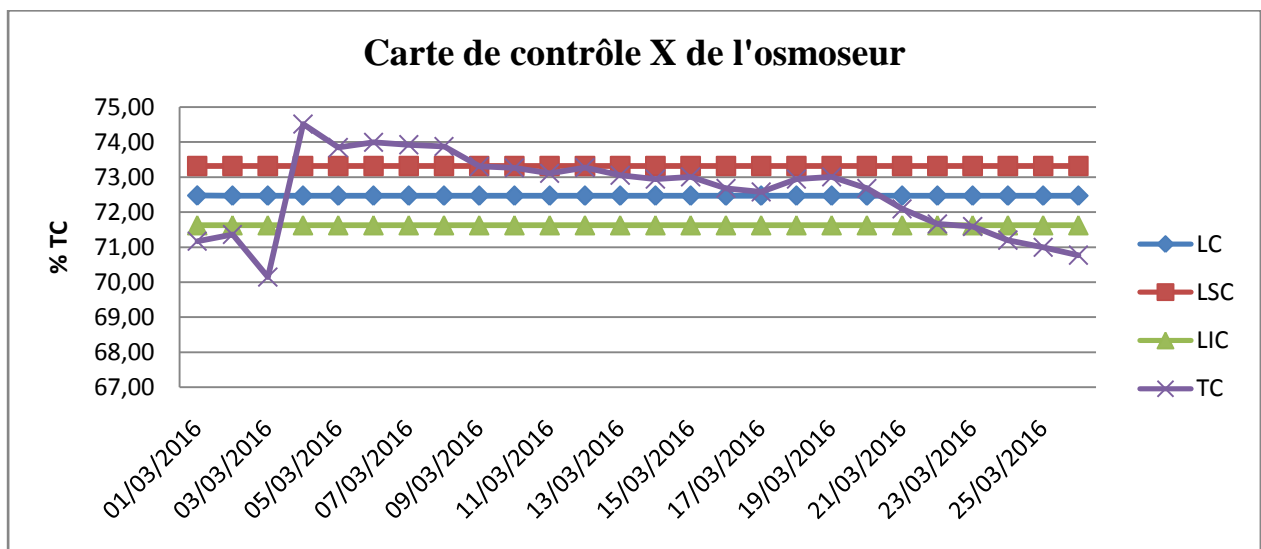


Figure 3.15 : carte de contrôle R de l'osmoseur

D'après la figure 3.15, on déduit que le processus est non maîtrisé pour la cause suivante : l'existence de plusieurs points en dehors des limites de contrôle, on remarque aussi que pour les points de 01/03/2016 jusqu'au 03/03/2016 le taux de conversion a diminué ; ce qui est expliqué par l'augmentation de débit de concentrât, cette augmentation provoque une perte importante d'eau, quant aux points de 04/03/2016 jusqu'au 08/03/2016, on observe une évolution rapide du TC grâce à un lavage acido-basique de l'osmoseur, on constate finalement une stabilisation des taux de conversion pendant 17 jours, juste après cette période, il commence à diminuer, vu le fonctionnement et l'accumulation des sels colmatés

Conclusion

En guise de conclusion, on tient à remettre l'accent sur l'enjeu majeur de ce projet de fin d'études qui était effectué dans la station de traitement des eaux, notre travail a donc été centré sur le cœur du processus du refroidissement des circuits de laminoir et aciérie. Toutefois, cette unité connaît un certain nombre de problèmes dont le plus important est celui de la corrosion.

Pour bien cerner la situation ; on a commencé par la détermination des vitesses de corrosion selon deux méthodes qui sont entre 0,7 et 3,5 MPY, qui dépendent de la nature du circuit de refroidissement, on a ensuite calculé l'efficacité de l'inhibiteur qui ne dépasse pas 25% même si l'inhibiteur est en excès dans les circuits, ces résultats obtenus nous permettent de connaître la gravité de la situation et donc nous inciter à proposer plusieurs solutions telles que :

- ✓ La protection par des revêtements.
- ✓ Le changement par un autre inhibiteur plus efficace comme suggestions, il y a des inhibiteurs à base d'acide carboxylique et d'autres qui combinent les amines et les acides carboxyliques.

Dans l'objectif de minimiser les coûts de la station de traitement des eaux, on constate que la plus propice et la moins coûteuse est celle de changement par un autre qui sera plus efficace à faible quantité. Pour mettre en œuvre cette solution, on a besoin d'une petite installation d'un circuit de test afin de ne pas influencer sur la production.

Ce circuit qui se structure comme suit :

- Une conduite d'acier de 6m : 500 dh
- Une pompe avec un débit de 10 m³/h : 4000 dh
- Un bac (1 m³) : 400 dh

On a besoin normalement de cinq installations qui vont servir à modifier la quantité de l'inhibiteur et/ou le changer parallèlement selon la composition de chaque circuit de refroidissement, mais on peut toutefois commencer par le circuit direct aciérie qui consomme chaque jours 580 dh (13,8 kg) d'inhibiteur et sa vitesse de corrosion est la plus grande de toutes, ce qui semble quand même paradoxal.

Concernant la deuxième partie de notre projet de fin d'études, elle a été consacrée à l'élaboration des cartes de contrôle des filtres à sable et de l'osmoseur, cela nous a permis de déclarer que le processus de filtration non maîtrisé a pour origine l'accumulation des matières en suspension ; ce qui nous a conduit à un phénomène de colmatage.

Pour une résolution efficace des problèmes, il faut donc obligatoirement éviter et/ou minimiser toutes les causes représentées sur le diagramme d'Ishikawa et opter pour un bon prétraitement avant la filtration, quant à l'osmoseur, on a proposé l'analyse des eaux qui sort des filtres à cartouche avant qu'il rentre à l'osmoseur pour protéger les membranes la plus longue durée possible car le coût de chacune d'elles est de 6000 dh. Notre objectif ultime est d'essayer d'améliorer et de minimiser les coûts du procédé de traitement des eaux.

Références

1. SONASID, Valeur et Performance rapport annuel de SONASID, 2012.
2. <http://www.eco30000.com/index.php/le-principe-de-l-osmose-inverse.html> (consulté le 3 Mars 2016).
3. http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manualaguafrancesweb_2.pdf (consulté le 20 Mars).
4. Dureté de l'eau, document proposé par le site « sciences physiques en BTS » : <http://nicole.cortial.net> (consulté le 1 Avril).
5. https://www.gov.mb.ca/waterstewardship/odw/publicinfo/fact_sheets/pdf/fr/factsheet_turbidity_fr.pdf (consulté le 03 Avril).
6. Professeur. Safia SABIR, cours : corrosion, Faculté des sciences et techniques-Fès.
7. IV : les différentes formes de corrosion Aqueuse ; Matériau métalliques- phénomènes de corrosion.
8. 2. C. Fiaud, C. Lemaitre, N. Pébère, *Corrosion et anticorrosion*, chapitre 13. Lavoisier, Paris, 2002.
9. NACE Glossary of corrosion Terms. *Materials Protection*, 4 (1965) 79.
10. D. Landolt. *Corrosion et chimie de surfaces des métaux*. Presses polytechniques et Universitaires Romandes, **Vol. 12**, Lausanne, 1997.
11. G. TrabANELLI, V. Carassiti, *Corrosion Science and Technology*, Plenum Press, New York, 1970.
12. [www.detrigne.com/conditionnement des eaux des circuits de refroidissement contre l'entartrage et la corrosion](http://www.detrigne.com/conditionnement%20des%20eaux%20des%20circuits%20de%20refroidissement%20contre%20l%27entartrage%20et%20la%20corrosion) (consulté le 25 Avril 2016).
13. <http://www.lenntech.fr/bibliotheque/ozone/refroidissement/ozone/ozone-applications-refroidissement-eau.htm#ixzz49VucTva8> (consulté le 05 mai 2016).
14. Professeur. Mohammed KHAYAR ; cours : Outils de la qualité ; Département techniques instrumentales et contrôle-qualité.

Liste des annexes

Annexe 1 : Procédé de fabrication.

Annexe 1.1 : Organigramme regroupant les opérations principales du procédé de broyage.

Annexe 1.2 : Organigramme regroupant les opérations principales du procédé de l'aciérie.

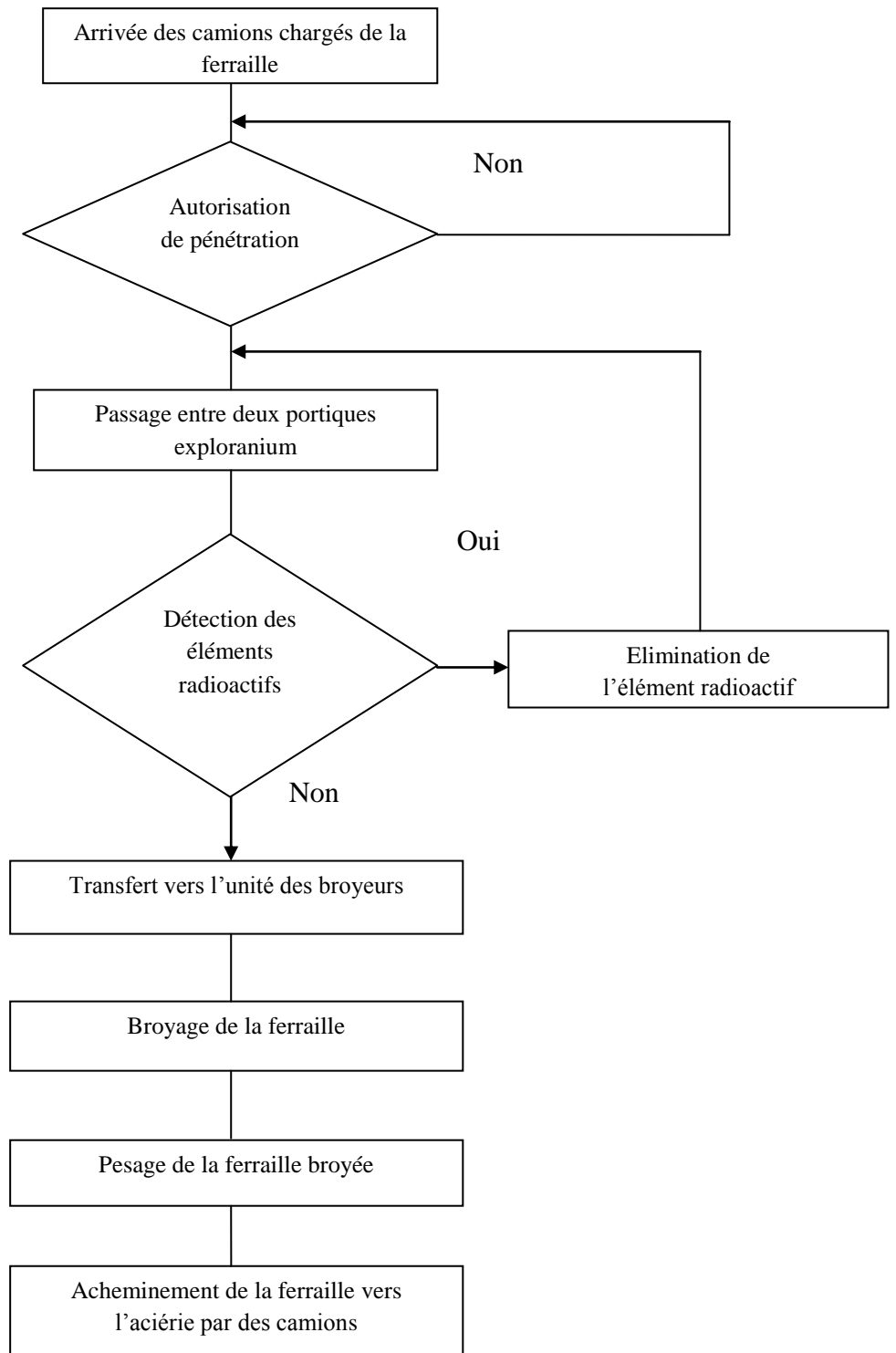
Annexe 1.3 : Organigramme regroupant les opérations principales du procédé du laminoir.

Annexe 2 : Les cartes de contrôle de la station de traitement des eaux.

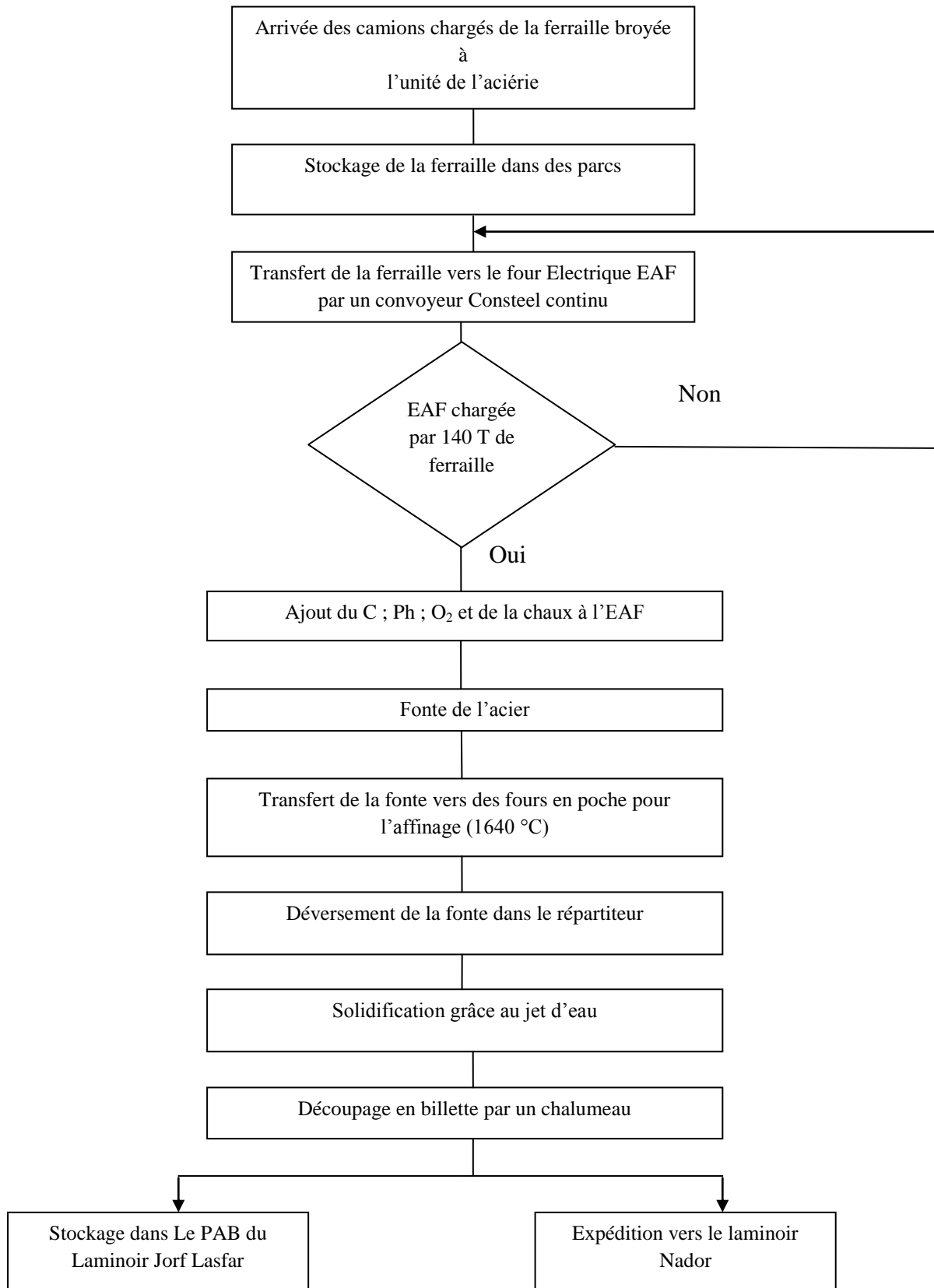
Annexe 2.1 : Table des constantes et formules des cartes aux mesures.

Annexe 2.2 : Tables des Constantes du Test de normalité Shapiro-Wilk.

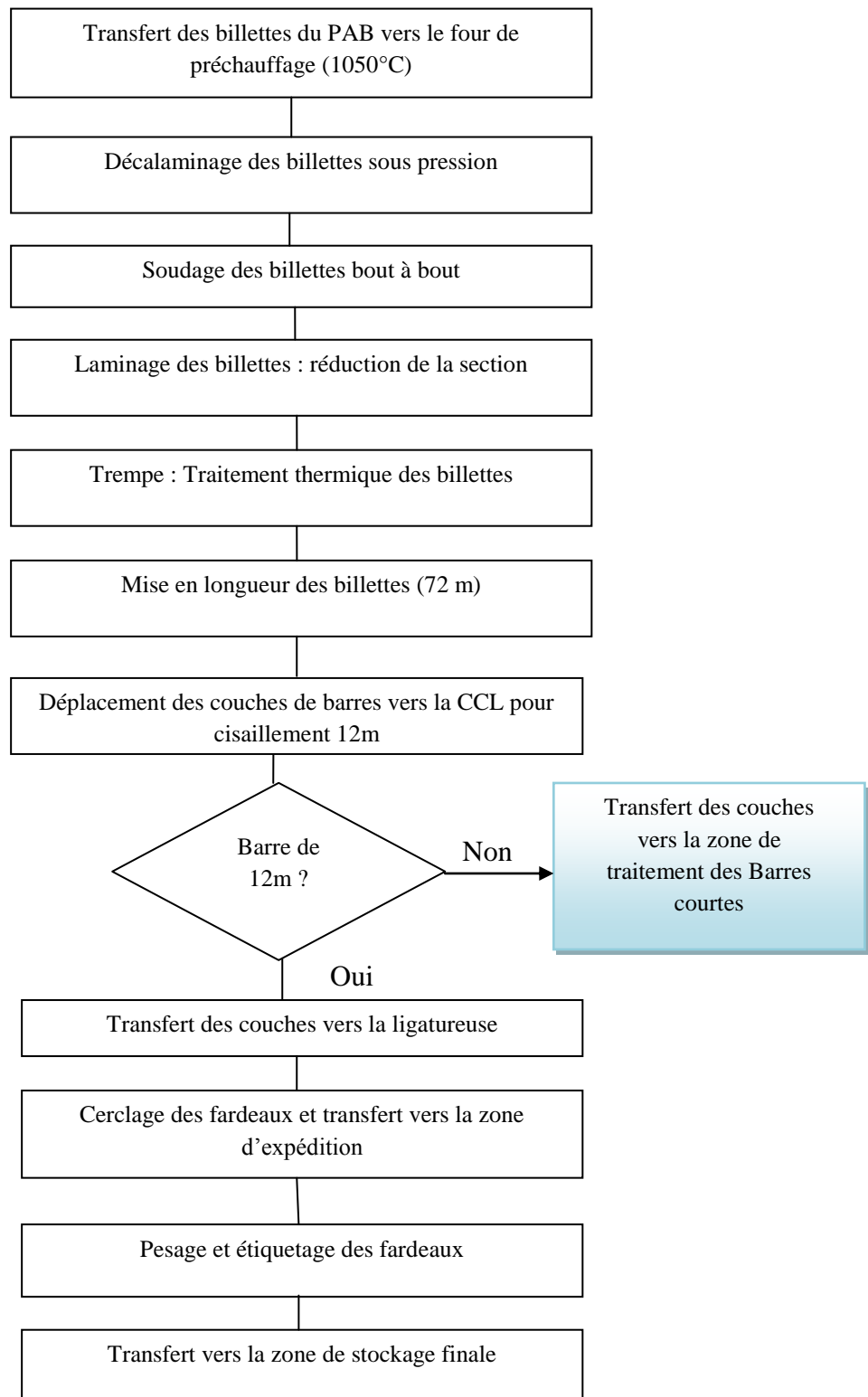
Annexe 1.1 Organigramme regroupant les opérations principales du procédé de broyage



Annexe 1.2 Organigramme regroupant les opérations principales exécutées dans l'aciérie



Annexe 1.3 Organigramme regroupant les opérations principales exécutées dans le laminoir



Annexe 2.1 : Table des constantes et formules des cartes aux mesures

Observations in Sample, <i>n</i>	Chart for Averages			Chart for Standard Deviations						Chart for Ranges						
	Factors for Control Limits			Factors for Center Line		Factors for Control Limits				Factors for Center Line		Factors for Control Limits				
	<i>A</i>	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>c</i> ₄	1/ <i>c</i> ₄	<i>B</i> ₃	<i>B</i> ₄	<i>B</i> ₅	<i>B</i> ₆	<i>d</i> ₂	1/ <i>d</i> ₂	<i>d</i> ₃	<i>D</i> ₁	<i>D</i> ₂	<i>D</i> ₃	<i>D</i> ₄
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	1.2533	0	3.267	0	2.606	1.128	0.8865	0.853	0	3.686	0	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	1.1284	0	2.568	0	2.276	1.693	0.5907	0.888	0	4.358	0	2.574
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	1.0854	0	2.266	0	2.088	2.059	0.4857	0.880	0	4.698	0	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	1.0638	0	2.089	0	1.964	2.326	0.4299	0.864	0	4.918	0	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	1.0510	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.3946	0.848	0	5.078	0	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	1.0423	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.3698	0.833	0.204	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	1.0363	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.3512	0.820	0.388	5.306	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	1.0317	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.3367	0.808	0.547	5.393	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	1.0281	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.3249	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.9754	1.0252	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.3152	0.787	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.9776	1.0229	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.3069	0.778	0.922	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.9794	1.0210	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.2998	0.770	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.9810	1.0194	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.2935	0.763	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.9823	1.0180	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.2880	0.756	1.203	5.741	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.9835	1.0168	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.2831	0.750	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.9845	1.0157	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.2787	0.744	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.9854	1.0148	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.2747	0.739	1.424	5.856	0.391	1.608
19	0.688	0.187	0.698	0.9862	1.0140	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.2711	0.734	1.487	5.891	0.403	1.597
20	0.671	0.180	0.680	0.9869	1.0133	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.2677	0.729	1.549	5.921	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.9876	1.0126	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.2647	0.724	1.605	5.951	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.9882	1.0119	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.2618	0.720	1.659	5.979	0.434	1.566
23	0.626	0.162	0.633	0.9887	1.0114	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.2592	0.716	1.710	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.157	0.619	0.9892	1.0109	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.2567	0.712	1.759	6.031	0.451	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.9896	1.0105	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.2544	0.708	1.806	6.056	0.459	1.541

For *n* > 25.

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{3}{\sqrt{n}} & A_3 &= \frac{3}{c_4 \sqrt{n}} & c_4 &\equiv \frac{4(n-1)}{4n-3} \\
 B_3 &= 1 - \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}} & B_4 &= 1 + \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}} \\
 B_5 &= c_4 - \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}} & B_6 &= c_4 + \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}}
 \end{aligned}$$

Annexe 2.2 : Tables des Constantes du Test de normalité Shapiro-Wilk

Table des coefficients (a_j)

$i \backslash n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,7071	0,7071	0,6872	0,6646	0,6431	0,6233	0,6052	0,5888	0,5739
2			0,1677	0,2413	0,2806	0,3031	0,3164	0,3244	0,3291
3					0,0875	0,1401	0,1743	0,1976	0,2141
4							0,0561	0,0947	0,1224
5									0,0399

Table des W à 99% et 95%

$n \backslash \alpha$	0,05	0,01
3	0,767	0,753
4	0,748	0,687
5	0,762	0,686
6	0,788	0,713
7	0,803	0,730
8	0,818	0,749
9	0,829	0,764
10	0,842	0,781
11	0,850	0,792
12	0,859	0,805
13	0,856	0,814
14	0,874	0,825
15	0,881	0,835
16	0,837	0,844
17	0,892	0,851
18	0,897	0,858
19	0,901	0,863
20	0,905	0,868



Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom: SAMIH Loubna

Titre: Détermination de la vitesse de corrosion des circuits de refroidissement et l'instauration des cartes de contrôle de la station de traitement des eaux

Résumé

Dans un environnement marqué par la mondialisation, l'évolution, la concurrence, la complexité et la rapidité des exigences du marché, les entreprises doivent faire preuve de dynamisme pour s'adapter rapidement et en souplesse aux nouvelles exigences et savoir saisir les opportunités. Soucieux d'améliorer la qualité des produits, d'optimiser le potentiel de production, de réduire les coûts, de moderniser les installations, dans ce sens la SONASID mène en continu plusieurs projets de développement dans les différentes zones de production et l'objectif de ce travail s'inscrit dans cette optique. Il s'agit de faire un diagnostic des différents problèmes qui touchent en particulier la station de traitement des eaux, qui fut le lieu de mon stage, ces problèmes concernent en général la corrosion des circuits de refroidissement Laminoir et Aciérie ainsi que la qualité du traitement de l'eau.

Dans une première partie, on a fait une étude de la vitesse de corrosion dans chaque circuit de refroidissement, ce qui nous a permis de calculer l'efficacité de l'inhibiteur qui était du pourcentage de 25%, on a proposé comme solution le changement de l'inhibiteur par un autre plus efficace.

Dans une deuxième partie, on a élaboré des cartes de contrôle des équipements utilisés dans le traitement (les filtres à sable et l'osmoseur), ces cartes nous ont permis de déclarer que le processus est non maîtrisé, pour les filtres à sable on a proposé plusieurs solutions on cite entre autres: la maintenance des moyens d'élimination de la boue dès la fosse calamine, quant à l'osmoseur on a proposé l'analyse des eaux qui sort des filtres à cartouche avant qu'il rentre à l'osmoseur.

Mots clés: Acier, eaux de refroidissement, corrosion, inhibiteur, cartes de contrôles.

