



Année Universitaire : 2013-2014

**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**

**ETUDE DE L'EFFICACITE DE L'ECHANGEUR 101FE03
DU CIRCUIT GAZ A L'ATELIER SULFURIQUE**

Présenté par:

FETAL Yousra

Encadré par:

- Mr. OUBUIH Saïd
- Pr. CHAOUQI Mohammed

Soutenu Le 19 Juin 2014 devant le jury composé de:

- Pr. CHAOUQI Mohammed
- Pr. SKALLI Khalid
- Pr. ZAITAN Hicham

**Stage effectué à :
Office Chérifien des Phosphates/IMACID**





2013/2014

Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom: FETAL Yousra

Titre: ETUDE DE L'EFFICACITE DE L'ECHANGEUR 101FE03 DU CIRCUIT GAZ A L'ATELIER SULFURIQUE

Résumé

L'atelier sulfurique de la Division Produits Intermédiaires joue un rôle important au sein d'IMACID. En effet, il assure la totalité du besoin en acide sulfurique et en énergie de l'atelier phosphorique. Il produit également de la vapeur haute et moyenne pression en profitant de l'énergie thermique résultante des réactions du procédé depuis la combustion du soufre jusqu'à l'obtention de l'acide sulfurique. Les vapeurs produites sont exploitées pour la production de l'énergie électrique et la concentration de l'acide phosphorique.

Pour cela l'installation contient la chaudière de récupération de chaleur perdue et les échangeurs de chaleur, mais dans certains temps l'encrassement en résulte des dépôts de sulfate de fer qui se déposent sur les parois de ces échangeurs, qui fait augmenter les pertes de chaleur et donc la perturbation de l'installation. C'est pourquoi on fait appel au nettoyage chimique par une solution de bicarbonate de soude (+ inhibiteur de corrosion d'acide sulfurique + eau)





Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL	2
I- Groupe OCP.....	3
II- Présentation du pôle chimique JORF LASFAR.....	3
III- Présentation générale d'IMACID	4
IV- Description de l'atelier sulfurique.....	6
V- Procédé de la fabrication de l'acide sulfurique H ₂ SO ₄	8
CHAPITRE 2 : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	10
I- Généralité sur les échangeurs de chaleur.....	11
II- Description de l'échangeur de chaleur E03 du circuit gaz à l'atelier sulfurique.....	14
III- Bilan thermique d'un échangeur de chaleur.....	16
IV- Efficacité thermique d'un échangeur de chaleur	16
V- Généralité sur l'encrassement	17
1- Définition.....	17
2- Apparition et développement de l'encrassement.....	17
3- Classification : différents types d'encrassement.....	18
4- Aspect économique	18
CHAPITRE 3 : PARTIE EXPERIMENTALE	19
I- Introduction	20
II- Bilan énergétique sur l'échangeur de chaleur E03.....	20
III- Profil de la variation de la quantité d'échange et de perte de chaleur de l'échangeur E03 pendant 2013-2014.....	23
1- La variation de quantité de chaleur dégagée par le gaz chaud	23
2- La variation de quantité de chaleur gagnée par le gaz froid	24
3- La variation de quantité de perte de chaleur	24
4- Interprétation.....	25
IV- Etude de l'efficacité de l'échangeur E03 au cours d'une année.....	25
V- Actions pour améliorer l'efficacité thermique de l'échangeur	26
VI- Proposition.....	27
CONCLUSION	29



BIBLIOGRAPHIE	30
ANNEXES	31

Liste des tableaux

Tableau 1: Les ateliers d'IMACID et leurs capacités	5
Tableau 2: Caractéristiques technique de l'échangeur de chaleur E03	15
Tableau 3: Caractéristiques de service de l'échangeur de chaleur E03	15
Tableau 4: caractéristiques du fluide chaud circulant dans l'échangeur E03 à gaz/gaz.....	21
Tableau 5 : Calcul des caractéristiques du fluide chaud circulant dans l'échangeur E03 à gaz/gaz	21
Tableau 6: caractéristiques du fluide froid circulant dans l'échangeur E03 à gaz/gaz.....	22
Tableau 7 : Calcul des caractéristiques du fluide froid circulant dans l'échangeur E03	22

Liste des figures

Figure 1: Schéma simplifié de l'activité industrielle d'IMACID	5
Figure 2: schéma général de la fabrication de l'Acide Sulfurique	8
Figure 3: Echangeur à tube à courant parallèle	12
Figure 4: Echangeur à tube à contre courant	12
Figure 5: Echangeur à plaques	13
Figure 6: Echangeur à bloc	14
Figure 7: Schéma représentant l'échangeur de chaleur E03.....	15
Figure 8: Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide	18
Figure 9: la variation de la quantité d'échange dégagée par le gaz chaud de l'échangeur E03 pendant un an	23
Figure 10: la variation de la quantité d'échange dégagée par le gaz chaud de l'échangeur E03 pendant un an	24
Figure 11: la variation de la quantité de perte de charge de l'échangeur E03 pendant un an	25
Figure 12: Profil de l'efficacité de l'échangeur au cours d'un an	26
Figure 13: nettoyage chimique de l'échangeur E03.....	27



Liste des abréviations :

CTE : Central.

DAP : Diamonium Phosphate.

HP : Haute Pression.

IMACID : Indo Maroc Phosphore.

MAP : Mono Ammonium Phosphate.

MP : Moyenne Pression.

NPK : Nitrate Phosphate Potassium.

OCP : Office Chérifien des Phosphates.

REM : Reprise d'Eau de Mer.

SNCC : Système Numérique de Contrôle Commande.

TED : Traitement d'Eau Douce.



INTRODUCTION GENERALE

Les chaleurs mises en œuvre dans les procédés de transfert représentent une importante dépense d'énergie dont il est nécessaire de récupérer la plus grande quantité possible en permettant, par exemple à un fluide chaud de transmettre sa chaleur à un fluide froid.

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés.

L'efficacité thermique d'un échangeur dépend de plusieurs paramètres entre autre les conditions expérimentales, notamment le régime d'écoulement et les températures des deux fluides chaud et froid.

Le présent rapport a pour objectif d'étudier l'efficacité thermique de l'échangeur thermique E03 utilisées comme échangeur gaz/gaz du circuit gaz à l'atelier sulfurique à IMACID.



❖ CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

- I. Présentation de l'Office Chérifien des Phosphates.
- II. Présentation du pôle Industriel Jorf Lasfar.
- III. Présentation d'IMACID.
- IV. Description de l'atelier sulfurique.
- V. Procédé de la fabrication de l'acide sulfurique.



I- GROUPE OCP

Le groupe OCP détient des positions fortes et reconnues mondialement dans le secteur industriel des Phosphates et ses produits dérivés, grâce à une expérience de plus de 86 ans. Il s'impose comme:

- Premier exportateur mondial des phosphates sous toutes formes.
- Premier exportateur mondial d'acide phosphorique.

Le groupe OCP est spécialisé dans l'extraction, le traitement, la valorisation et la commercialisation des Phosphates et de ses produits dérivés. Ces procédés sont définis comme suit :

- Extraction : C'est une opération de l'extraction à ciel ouvert des phosphates. Elle se fait en quatre cycles : fourrage, sautage, découpage et défunter.
- Traitement : Son but est de valoriser les phosphates bruts par des méthodes de traitement en vue de son exportation, elle se compose de plusieurs opérations : criblage, séchage, calcination, flottation et enrichissement à sec.
- Valorisation : C'est la production des acides phosphoriques et des engrais dans les entités chimiques du groupe à Jorf Lasfar et Safi.

II- PRESENTATION DU POLE CHIMIQUE JORF LASFAR

Situé sur le littoral atlantique, à 20 km au sud-ouest d'El Jadida, le complexe industriel de JORF LASFAR a démarré sa production en 1986. Cette nouvelle unité a permis au Groupe OCP de doubler sa capacité de valorisation des phosphates. L'endroit a été choisi pour ses multiples avantages : Proximité des zones minières, existence d'un port profond, disponibilité de grandes réserves d'eau et présence de terrains pour les extensions futures.

Cet ensemble, qui s'étend sur 1.700 hectares, permet de produire chaque année 2 millions de tonnes P_2O_5 sous forme d'acide phosphorique, nécessitant la transformation de 7,7 millions de tonnes de phosphate extraits des gisements de Khouribga, 2 millions de tonnes de soufre et 0,5 million de tonnes d'ammoniac. Les besoins en énergie du complexe sont satisfaits par une centrale de 111 MW utilisant la chaleur de récupération.

Une partie de la production est transformée localement en engrais DAP, MAP, et NPK, ainsi qu'en acide phosphorique purifié. L'autre partie est exportée sous forme d'acide phosphorique marchand via les installations portuaires locales. Les procédés utilisés pour la production d'acide



phosphorique et des engrais sont munis de système à double lavage des gaz avec recyclage du liquide dans la boucle de production. Résultat : des émissions gazeuses fortement atténuées et aucun rejet liquide. Autre initiative: le point de rejet des effluents de phosphogypse dans l'océan a été choisi dans une zone à forts courants marins, selon les recommandations d'une étude océanographique et sédimentologique.

III- PRESENTATION GENERALE D'IMACID

IMACID est un complexe industriel moderne à proximité de Maroc Phosphore à Jorf Lasfar. C'est une société Maroco-Indienne (1/3 pour le Groupe OCP, 1/3 pour le Groupe BIRLA et le dernier 1/3 pour le nouveau associé le groupe TATA Chemical) constituée en 1997. Son capital est de 620 millions de dirhams.

Le coût du projet est de 2 milliards de DH. La surface occupée par l'ensemble des ateliers est de 112.500 m². La commercialisation du produit est répartie comme suit :

- 2/3 pour les partenaires
- 1/3 pour les autres marchés.

Le complexe industriel IMACID a démarré en Octobre 1999. Son potentiel de production est devenu en septembre 2006, après augmentation de capacité, 430.000 tonnes de P₂O₅ et 1.300.000 tonnes d'H₂SO₄ par an. La plateforme présente de nombreux avantages :

- Sa proximité du gisement minier de Khouribga.
- Sa proximité du port avec un grand tirant d'eau.
- Une alimentation en eau de mer et en eau douce sur ces faibles distances.
- L'existence des grandes facilités industrielles.
- Une possibilité d'utilisation de l'infrastructure de MAROC PHOSPHORE III-IV.

L'énergie électrique nécessaire est fournie par un groupe turboalternateur de 27 MW fonctionnant au moyen de la vapeur haute pression produite par la chaleur dégagée par la combustion du soufre.

IMACID a été conçu en adoptant les procédés et les technologies les plus innovants en matière d'environnement et d'information :

- Procédé d'acide sulfurique MONSANTO à double absorption.
- Procédé d'acide phosphorique PRAYON MARK IV avec unité de lavage des gaz.



- Unités conduites par un système numérique de contrôle commande (SNCC).

Tableau 1: Les ateliers d'IMACID et leurs capacités

Atelier Sulfurique	<ul style="list-style-type: none">» Capacité nominale de 3800 t/jour.» Procédé type MONSANTO à double absorption.» 194 t/h de vapeur HP (chaudière).
Atelier Phosphorique	<ul style="list-style-type: none">» Capacité nominale : 1100 à 1400 tonnes de P_2O_5 par jour d'acide à 54% en P_2O_5.» Procédé : PRAYON» Système de broyage : broyage humide» Concentration : quatre échelons de 440 tonnes P_2O_5 par échelon, à échangeurs tubulaires en graphite.
Atelier Utilités	<ul style="list-style-type: none">» Une centrale thermoélectrique (CTE) avec :<ul style="list-style-type: none">• Un groupe turbo alternateur de 27.6 MW.• Une liaison avec le réseau vapeur HP de Maroc Phosphore III-IV afin de fournir la vapeur pour les démarrages et augmenter la flexibilité du fonctionnement de l'ensemble du complexe Jorf Lasfar.» Un atelier de traitement des eaux (TED) composé de :<ul style="list-style-type: none">• Deux chaînes de filtration à sable et à charbon actif.• Deux chaînes de déminéralisation d'eau• Deux lignes de polissage• Une station de compression d'air.» Une station de reprise d'eau de mer (REM).

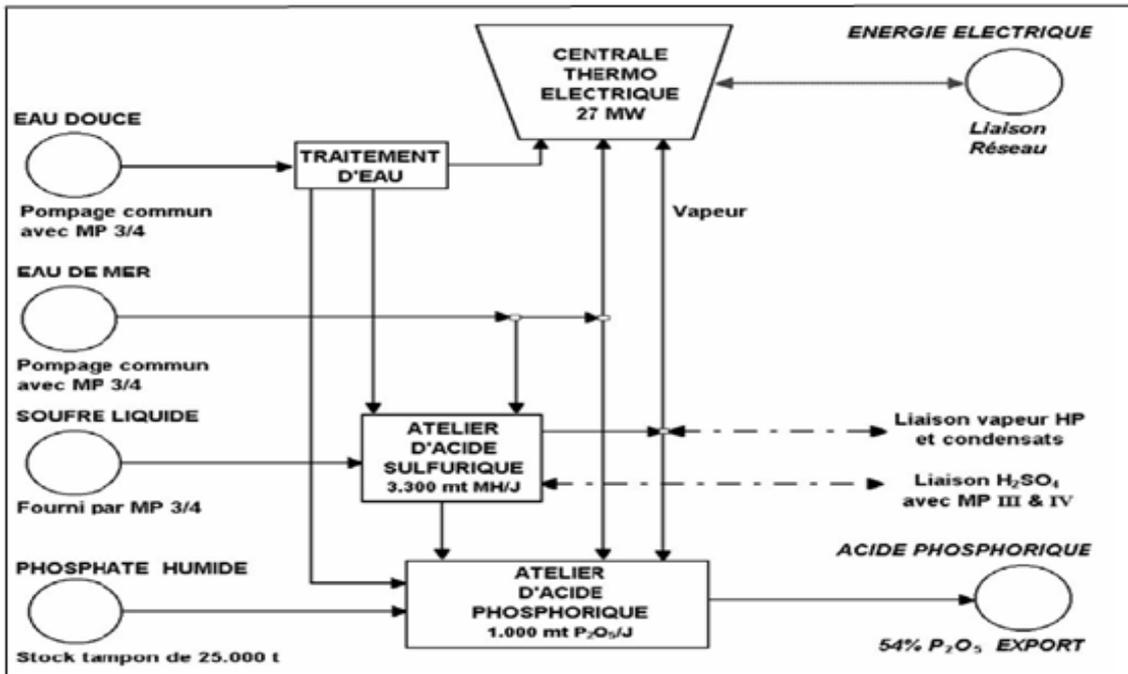


Figure 1: Schéma simplifié de l'activité industrielle d'IMACID

IV- DESCRIPTION DE L'ATELIER SULFURIQUE

L'atelier sulfurique est conçu pour la production de l'acide sulfurique. C'est un composé chimique toxique, minéral fort, il peut se mélanger avec l'eau en toute proportion.

Pour produire l'acide sulfurique H_2SO_4 à 98.5% à partir du soufre, cet atelier comprend l'ensemble de trois unités : l'unité 101, l'unité 111 et l'unité 112.

➤ Unité 111 [annexe 1] :

C'est l'unité de stockage du soufre liquide venant de l'unité 51, elle contient un bac de stockage du soufre (1), une fosse (2), 2 pompes de forage et 2 vannes régulatrices au niveau de fosse, cette unité sert à alimenter le four (3) de la ligne sulfurique en soufre liquide a une température légèrement supérieur à 100 °C.

Le soufre est maintenu liquide dans le bac de stockage et la fosse de pompage par l'intermédiaire de vapeur basse pression.

➤ Unité 101 [annexe 1]:

Cette unité produit 2300 à 2650t/j d'acide sulfurique, elle est composée de :

- 1 turbine (4) ;
- 1 soufflante(5) ;



- 1 four à soufre (3) ;
- 2 chaudières de récupération (6) ;
- 1 ballon de purge ;
- 1 filtre à air (7);
- 1 filtre à gaz chaud (8) ;
- 1 tour de séchage (9);
- 1 tour d'absorption intermédiaire (10) ;
- 1 tour d'absorption finale (11);
- 4 refroidisseurs d'acide (12) ;
- 2 échangeurs (13) ;
- 1 économiseur (14) ;
- 2 surchauffeurs (15);
- 1 économiseur surchauffeur (16) ;
- 2 bacs d'acide (17);
- 1 convertisseur(18) ;

Les trois principaux circuits d'une même ligne sont :

- Circuit gaz.
- Circuit acide.
- Circuit vapeur.

➤ Unité 112 [annexe 1]

C'est une unité qui sert à stocker l'acide sulfurique et à alimenter les ateliers de production d'acide phosphorique et d'engrais en acide sulfurique. Elle se compose de :

- 02 bacs de stockage d'acide sulfurique (19);
- 02 pompes (20)
- 01 fosse de vidange d'acide sulfurique (21).

Le stockage d'acide sulfurique se fait dans deux bacs ayant une capacité utile unitaire de 13500 tonnes de monohydrates.



Le bac de stockage reçoit l'acide en provenance de la ligne de production. Au sommet du bac est installé un système pour la déshumidification de l'air, dans le but d'éviter que l'humidité entre dans le bac.

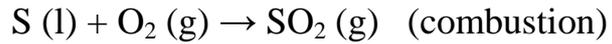
Le bac de reprise correspondant au bac de stockage est équipé d'une pompe verticale. Quatre pompes, travaillent en continu, sont connectées à quatre tuyauteries de transfert qui sont destinés à l'usage de l'atelier phosphorique. Chacune des deux pompes restantes (pompes secours) est connectée à deux des quatre tuyauteries de transfert.



V- PROCÉDE DE LA FABRICATION DE L'ACIDE SULFURIQUE H₂SO₄

Les principales étapes du procédé consistent à :

- Brûler du soufre comme matière première avec de l'oxygène (O₂) afin de former du dioxyde de soufre (SO₂).



- Combiner le dioxyde de soufre avec de l'oxygène pour former du trioxyde de soufre (SO₃)



- Combiner le trioxyde de soufre avec de l'eau (H₂O) pour obtenir une solution d'acide sulfurique H₂SO₄

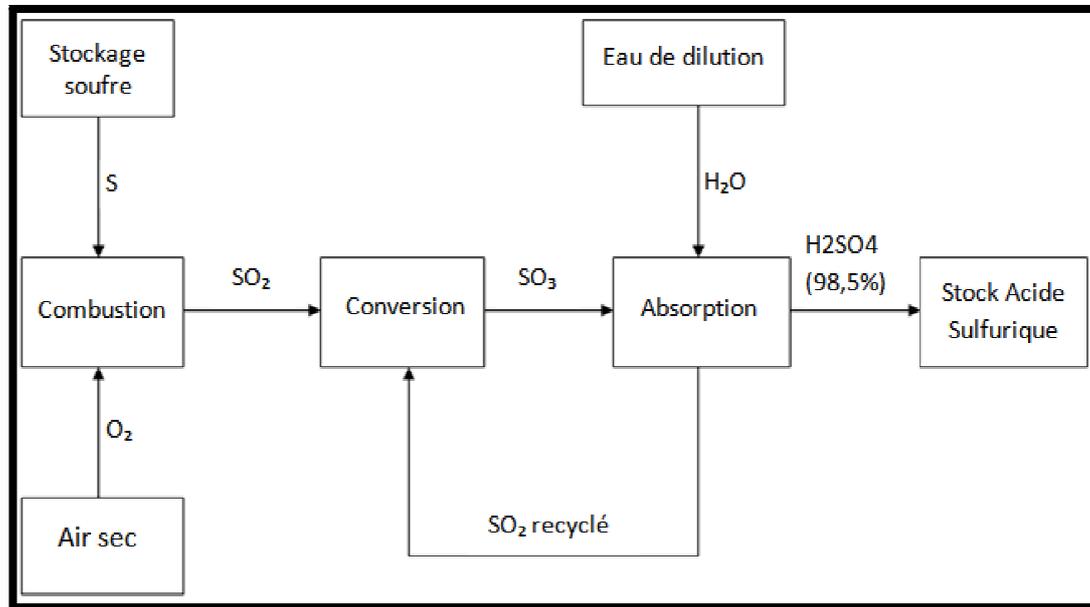


Figure 2: schéma général de la fabrication de l'Acide Sulfurique



Le soufre liquide est pompé de la fosse à soufre vers le four de soufre à travers six brûleurs permettant sa pulvérisation et donc une combustion totale et instantané. Il brûle avec l'oxygène contenu dans l'air soufflé à l'aide d'une turbosoufflante passant par un filtre à air pour éliminer les poussières contenues dans l'air et par une tour de séchage pour éviter la formation de bouillard d'acide. La réaction de combustion est exothermique pour cela les gaz produits venant de la chaudière pour diminuer sa température passant par un filtre à gaz chaud qui est muni de deux lits de chamotte réfractaire concassée pour éliminer les sandres, avant de pénétrer dans le convertisseur, où SO_2 est converti en SO_3 en présence de catalyseur de vanadium V_2O_5 . Ce convertisseur contient 4 masses catalytiques. La quantité de catalyseur dans le convertisseur est étudiée pour convertir 99,6% de SO_2 à la capacité nominale de production. Dans les trois premières couches, 95% de la conversion a eu lieu. Le SO_3 formé dans ces trois premières couches est tiré du gaz (absorption intermédiaire) avant que le gaz ne soit envoyé vers la quatrième couche. La plus grande partie de SO_2 restant est convertie en SO_3 dans la quatrième couche avant d'aller dans la tour d'absorption finale. La solution de l'acide sulfurique produite continue son chemin vers les réservoirs de stockage d'acide sulfurique. [voir annexe 2]

Les étapes de la combustion et de la conversion dans ce procédé de la production de l'acide sulfurique à partir du soufre comme matière première sont hautement exothermiques, et les excès de chaleur générés à chaque étape du procédé sont récupérés pour la production de vapeur à haute pression (HP) par la chaudière de récupération de la chaleur perdue (associée au four) et des échangeurs. L'eau alimentaire circule vers l'économiseur E05 puis vers l'économiseur E04 et revient vers l'économiseur E05, aux conditions nominales ces économiseurs réchaufferont l'eau de 110°C à 244°C avant qu'elle soit alimentée à la chaudière, et une partie de la vapeur saturée produite dans la chaudière circule vers le surchauffeur E05 et l'autre partie circule vers le surchauffeur E14 pour qu'elle se regroupe et circule vers le surchauffeur E01; aux conditions nominales ces surchauffeurs surchaufferont la vapeur saturée à une vapeur surchauffée (HP) jusqu'à environ 500°C . 1/3 de cette vapeur HP est utilisée pour entraîner la turbine du compresseur principal et 2/3 pour le service CTE. [voir annexe 3]



CHAPITRE 2 : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

- I- Généralité sur l'échangeur de chaleur.**
- II- description de l'échangeur de chaleur intermédiaire 101FE03.**
- III- Bilan thermique et l'efficacité thermique sur un échangeur de chaleur.**
- IV- Actions pour améliorer l'efficacité de l'échangeur**



I- GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

Dans les sociétés industrielles, les échangeurs de chaleur constituent un élément essentiel et indispensable pour la maîtrise de l'énergie.

Ils sont utilisés dans un grand nombre d'applications. On peut trouver ces échangeurs de chaleur dans: système à air conditionné d'un habitat, radiateurs de voiture, planchers chauffants, chaudières, distillerie, réchauffement d'une piscine, centrale thermique, cependant les utilisateurs de ce types d'appareils rencontrent plusieurs difficultés au niveau du fonctionnement à cause du problème d'encrassement qui influence la capacité thermique de l'échangeur et agit sur ses performances d'échange.

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant la récupération de l'énergie thermique d'un fluide par un autre. Le flux thermique traverse la paroi de séparation des différents fluides. Selon la deuxième loi de la thermodynamique, ce transfert d'énergie s'effectue de la température la plus importante vers la plus faible. Il s'arrête donc lorsque les deux milieux sont de températures identiques. [1]

La chaleur peut être transférée par trois modes différents : la conduction, la convection et le rayonnement. [1]

- La conduction est un mode de transfert de chaleur dû à une différence de température entre deux milieux en contact. A l'inverse de la convection, il s'effectue sans déplacement global de matière. C'est le transfert d'énergie des particules les plus énergétiques aux particules voisines les moins énergétiques. La conduction peut s'effectuer dans les solides, les liquides ou les gaz. La grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors de ce phénomène est la conductivité thermique.
- La convection s'effectue par un déplacement de matière dans le milieu. C'est le transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. C'est le mode le plus important pour les échangeurs de chaleur, il dépend du type de fluide, des vitesses et du type de l'échangeur.
- Le rayonnement est un transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques Au niveau des échangeurs thermiques, c'est le moins dominant des modes de transfert thermique. [1]

Il existe en générale deux manière de classer les échangeurs thermiques, selon le sens de l'écoulement des fluides et selon leurs géométries. [1]

Selon la classification suivant le sens d'écoulement, on distingue les échangeurs :

- à courants parallèles : les deux fluides circulent parallèlement et vont dans le même sens (Figure 3)

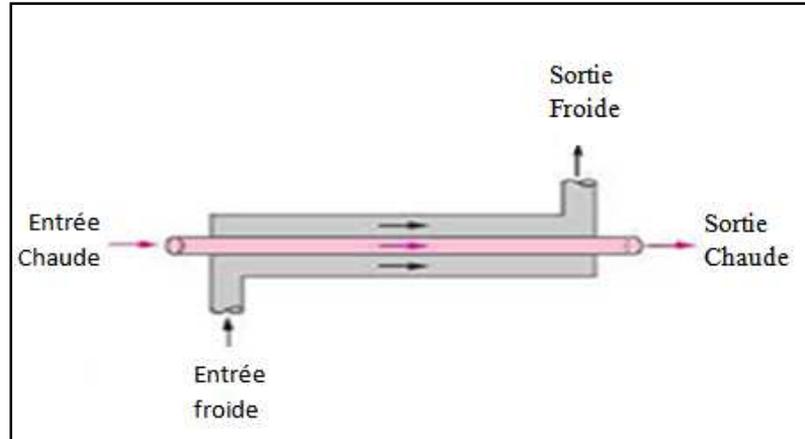


Figure 3: Echangeur à tube à courant parallèle [1]

- à contre-courants : les deux fluides circulent parallèlement mais vont dans le sens opposé (Figure 4).

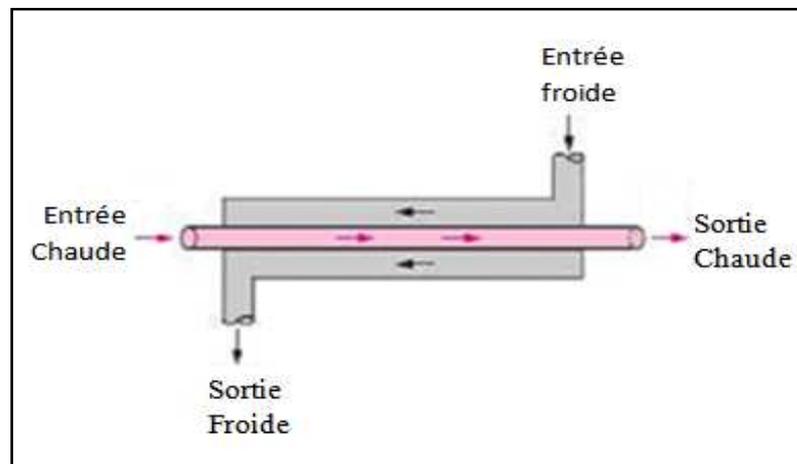


Figure 4: Echangeur à tube à contre courant [1]

- à courants croisés : les deux fluides circulent perpendiculairement.
- à tête d'épingle : un des fluides fait demi-tour dans un conduit plus large tandis.
- à contact direct ou à mélange : les deux fluides sont mis en contact, (tour de refroidissement, par exemple). [1]



Et selon la Classification suivant la géométrie on distingue :

- Les échangeurs tubulaires : Les échangeurs tubulaires représentent presque la moitié des échangeurs thermiques vendus en France et en Europe. Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier il présente des facilités au niveau de la fabrication et de la maintenance il présente aussi l'avantage d'être utilisés à des pressions élevées et à de fortes températures.

On distingue, le plus souvent, trois catégories : [2]

- Les échangeurs monotubes pour lesquels le tube est placé dans un réservoir ; [2]
- Les échangeurs multitubulaires qui existent sous 4 formes : [2]
 - Les échangeurs à tubes séparés : sont caractérisés par la présence de plusieurs tubes à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant. La séparation entre les types se fait à l'aide des barres ou bien entretoises.
 - Les échangeurs à tubes rapprochés : dans cette catégorie, les tubes sont maintenus les uns sur les autres.
 - Les échangeurs à tubes et calandre : ce type d'échangeur est caractérisé par la présence d'une calandre sous forme d'une enveloppe métallique et qui entoure un faisceau des tubes. [2]
- Echangeurs à plaques: Ceux sont des échangeurs composés d'un nombre variant de plaques disposées les unes à côté des autres et séparées par un espace (figure 5). Les fluides chauds et froids circulent en passages alternés, chaque fluide froid est entouré par deux fluides chauds et inversement. Grace à leur compacité, ces échangeurs permettent une grande surface d'échange dans un volume limité. [3]

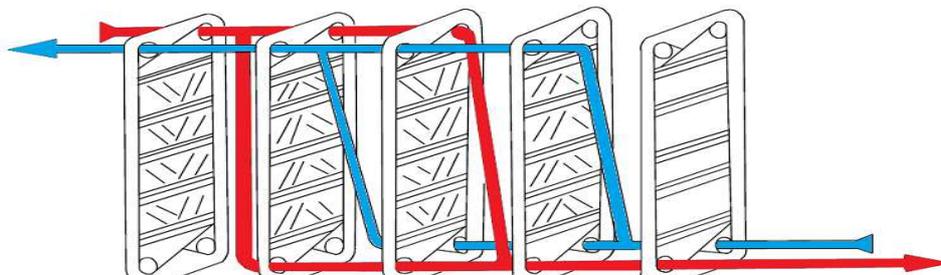


Figure 5: Echangeur à plaques [3]

Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) ou l'industrie nucléaire. Les plaques sont généralement en acier inoxydable en particulier dans l'agroalimentaire pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique. [3]

- Les échangeurs à bloc : c'est un type d'échangeur constitué à base de blocs (figure 6) percé de multiples canaux dans lesquels circulent les 2 fluides. Le bloc est le plus souvent composé de graphite additionné parfois de polymères pour améliorer les propriétés mécaniques de l'échangeur, et il est placé dans une structure qui assure la distribution des liquides dans les canaux. [3]

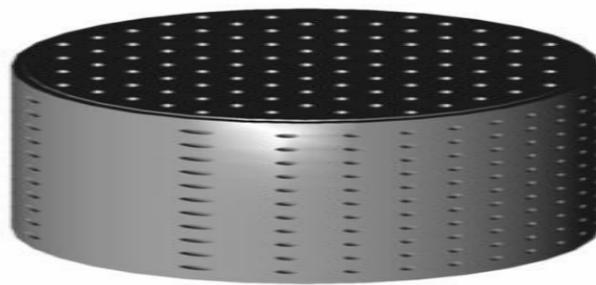


Figure 6: Echangeur à bloc [3]

II- DESCRIPTION DE L'ÉCHANGEUR DE CHALEUR E03 DU CIRCUIT GAZ A L'ATELIER SULFURIQUE:

L'échangeur E03 est un échangeur intermédiaire tubulaire vertical dont la calandre et les tubes sont en acier au carbone. La calandre a un diamètre intérieur de 5260 mm. Elle contient 3348 tubes en acier de diamètre 50,8 mm et de longueur 10363 mm. Le côté calandre refroidit le gaz quittant la troisième passe du convertisseur, le côté tube réchauffe partiellement le gaz SO₂ provenant de la tour intermédiaire avant qu'il entre dans l'échangeur de chaleur intermédiaire chaud. [4]

Le côté calandre refroidit le gaz quittant la troisième masse du convertisseur, le côté tube réchauffe partiellement le gaz SO₂ provenant de la tour intermédiaire avant qu'il entre dans l'échangeur de chaleur intermédiaire chaud. [4]

Tableau 2: Caractéristiques technique de l'échangeur de chaleur E03 [4]

Fonction primaire	Contrôle de T° d'entrée 4e couche
Calendre	
Diamètre (mm)	5840
Matériau	ASTM A249 Gr A 304
Tubes	
Nombre	1854
D int / D ext (mm)	50.8/52.9
Longueur (mm)	10360
Matériaux	ASTM A249 Gr A 304

Tableau 3: Caractéristiques de service de l'échangeur de chaleur E03 [4]

	calendre		tube	
	entrée	sortie	entrée	sortie
T (K)	749	587	289	569
P (bar)	24,7509	21,6359	14,1688	11,748

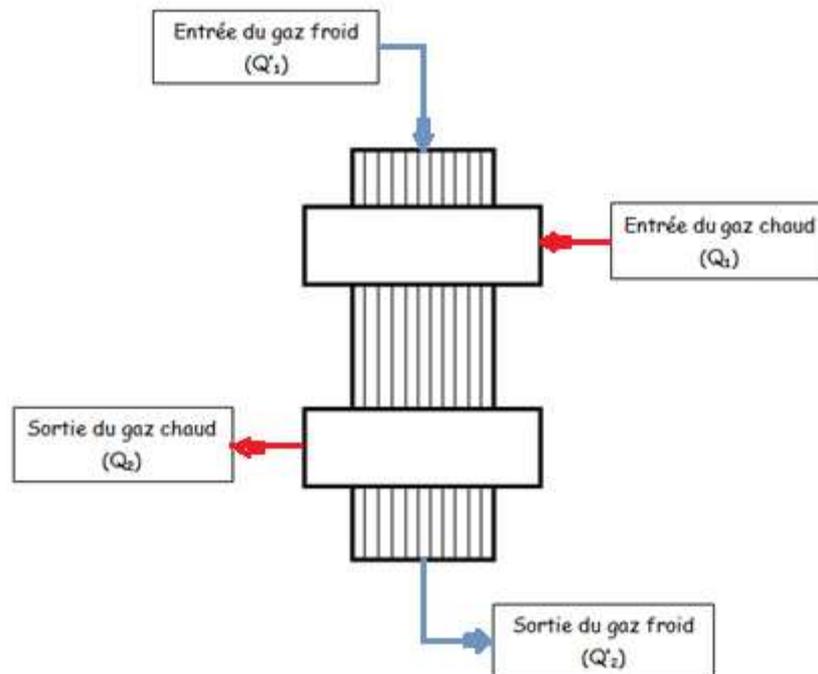


Figure 7: Schéma représentant l'échangeur de chaleur E03



III- BILAN THERMIQUE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR

Un bilan énergétique permet de mettre en évidence de manière chiffrée la consommation énergétique et d'évaluer les pertes thermiques de chaque unité.

Une première expression du flux de chaleur transféré dans un échangeur peut être déterminée en écrivant qu'il est égale au flux de chaleur perdue par le fluide chaud et au flux de chaleur gagnée par le fluide froid pendant leur traversé de l'échangeur.

$$Q = Q_{\text{deg}} = Q_{\text{rec}}$$

Avec

$$Q = \frac{\dot{m}}{M} \times C_p \times (T_{ce} - T_{cs}) = \frac{\dot{m}'}{M'} \times C_{p'} \times (T_{ce}' - T_{cs}')$$

- Q_{deg} : flux de chaleur dégagé par le fluide chaud (J/h).
- Q_{rec} : flux de chaleur reçu par le fluide froid (J/h).
- \dot{m} : débit massique du fluide chaud (Kg/h).
- \dot{m}' : débit massique du fluide froid (Kg/h).
- M : masse molaire du fluide chaud (Kg/mol).
- M' : masse molaire du fluide froid (Kg/mol).
- C_p et $C_{p'}$: sont respectivement les chaleurs spécifiques du gaz chaud à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (J/mol/°K).
- T_{ce} et T_{cs} : sont respectivement les températures du fluide chaud à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (°K).
- T_{fe}' et T_{fs}' : sont respectivement les températures du fluide froid à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (°K).

IV- EFFICACITE THERMIQUE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR

L'efficacité d'un échangeur est le rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance d'échange maximum théoriquement possible, avec les mêmes conditions d'entrées des fluides (nature, débit,..) dans l'échangeur. On peut donc la représenter selon l'équation suivante : [5]

$$E = (T_{ce} - T_{cs}) / (T_{ce} - T_{fe})$$

V- GENERALITE SUR

1- Définition



L'encrassement, qui sous sa forme la plus générale peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, donc Le phénomène d'encrassement se manifeste par une déposition des particules solides sous forme de couches adhérentes à la face intérieure des parois. Ces couches influencent le coefficient de transfert thermique global qui chute, car la résistance thermique due à l'encrassement augmente, affecte une grande variété d'opérations industrielles car L'échange ne se fait pas totalement. Dans le cas des échangeurs, la présence d'un fort gradient thermique près de la surface peut perturber les mécanismes d'encrassement isotherme rencontrés, par exemple lors de l'utilisation de membrane ou de filtre.

2- Apparition et développement de l'encrassement

L'apparition et le développement de l'encrassement se fait généralement en cinq phases. Ces cinq phases peuvent chronologiquement se décomposer comme suit. [3]

- Initiation : Cette phase est associée au temps nécessaire avant la formation d'un dépôt encrassant sur une surface propre.
- Transfert des particules à la paroi : Il peut être contrôlé par la diffusion turbulente, l'impaction inertielle ou un champ de forces extérieures (thermiques, électriques, etc.) ; ces mécanismes peuvent coexister.
- Adhésion des particules : Les particules transférées à la paroi peuvent s'y maintenir grâce aux forces d'adhésion dues à l'attraction moléculaire (forces de Van der Waals), aux forces électriques ou capillaires.
- Réentraînement des particules déposées : Il est classique de supposer que le mécanisme de réentraînement est lié aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt. Lorsque la force aérodynamique est supérieure aux forces d'adhésion d'une particule, le réentraînement se produit par érosion (figure 8) ; lorsqu'il concerne des agglomérats de particules, il correspond à un phénomène d'écaillage.
- Vieillessement du dépôt : Il s'agit d'un changement de texture du dépôt d'origine chimique ou cristalline. On peut alors observer soit sa consolidation, soit son écaillage.

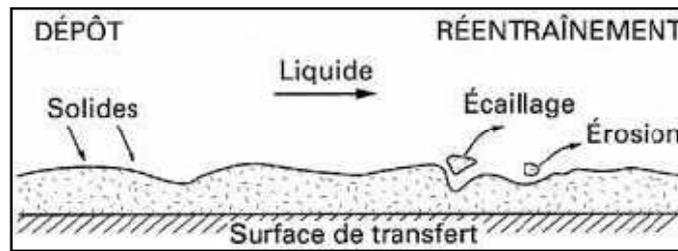


Figure 8: Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide

3- Classification : différents types d'encrassement

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt, selon les conditions d'utilisation de l'échangeur ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt. Dans la plus part des cas on adapte la dernière méthode de classification. Six types différents peuvent alors être définis : [3]

- encrassement particulaire ;
- corrosion ;
- entartrage ;
- encrassement biologique ;
- encrassement par réaction chimique ;
- encrassement par solidification. [3]

4- Aspect économique

L'encrassement des échangeurs thermiques induit un certain nombre d'effets indésirables ayant un coût économique non négligeable :

- Il diminue le coefficient d'échange de transfert thermique et par conséquent, pour un coefficient voulu, le coût augmente.
- Il contribue à la modification de l'écart de température au niveau de l'échangeur de chaleur et par conséquent la consommation énergétique augmente. Cette modification aussi peut engendrer un coût de plus dû aux pannes au niveau des équipements
- Il engendre des coûts d'entretien très élevés afin d'éliminer les dépôts formés par le biais des produits chimiques et des dispositifs antisalissure ou mécanique ou encore le remplacement définitif des équipements encrassés. A ces coûts s'ajoute celui de consommation d'eau, d'électricité et de carburant qui augmentent pour compenser les effets de l'encrassement.



-
- Il peut être l'origine des pertes de production liées aux arrêts d'exploitation planifiés ou non.
[3]



❖ CHAPITRE 3 : PARTIE EXPERIMENTALE

- I- Introduction
- II- Bilan thermique sur l'échangeur de chaleur E03
- III- Profil de la variation des quantités d'échange de l'échangeur E03 pendant 2013/2014
- IV- Etude d'efficacité de l'échangeur E03 au cours du cycle 2013/2014



I- INTRODUCTION

Avant de se prononcer pour une amélioration quelconque, il est indispensable de faire un état de lieu commençant par l'établissement d'un bilan thermique en fonction de cycle de production (2013/2014).

Le but de ce bilan thermique est de déterminer les échanges thermiques qui ont eu lieu dans l'échangeur de chaleur, et ce afin d'améliorer leurs performances.

II- BILAN ENERGETIQUE SUR L'ECHANGEUR DE CHALEUR E03

La quantité nécessaire de chaleur Q dégagée par le gaz chaud est

$$Q_{\text{deg}} = Q_1 - Q_2$$



$$Q_{\text{deg}} = \left(\frac{\dot{m}}{M} \times C_{p1} \times T_1 \right) - \left(\frac{\dot{m}}{M} \times C_{p2} \times T_2 \right)$$

Avec :

- Q_1 : la quantité de chaleur du gaz chaud à l'entrée de l'échangeur (J/h).
- Q_2 : la quantité de chaleur du gaz chaud à la sortie de l'échangeur (J/h).
- \dot{m} : débit massique du gaz chaud à l'entrée et la sortie de l'échangeur (Kg/h) (conservation de matière).
- M : masse molaire du gaz chaud (Kg/mol).
- C_{p1} et C_{p2} : sont respectivement les chaleurs spécifiques du gaz chaud à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (J/mol/°K).
- T_1 et T_2 : sont respectivement les températures théoriques du gaz chaud à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (°K).

En effet le gaz chaud à l'entrée et à la sortie de l'échangeur se compose de: SO_2 , SO_3 , N_2 et O_2 avec des fractions molaires (X_n) différentes.



Tableau 4: caractéristiques du fluide chaud circulant dans l'échangeur E03 à gaz/gaz

Composé	Cp (J/mol/K)	Xn (%)	Masse Molaire (Kg/mol)
SO ₂	$15,29 + 0.00326T + 50000/T^2$	0,83	0,064
SO ₃	$15,29 + 0.00326T + 50000/T^2$	11,66	0,080
N ₂	$27,88 + 0,00427T$	83,66	0,028
O ₂	$29,97 + 0,004185T - 167400/T^2$	3,85	0,032

D'après le tableau précédant on a calculé la chaleur spécifique de chaque composé et la multiplié par sa fraction molaire correspondante, puis on a réduit la chaleur spécifique du mélange faisant la somme des chaleurs spécifiques précédentes, et on a obtenue les résultats suivants :

Tableau 5 : Calcul des caractéristiques du fluide chaud circulant dans l'échangeur E03 à gaz/gaz

Gaz chaud	T (K)	Cp (J/mol/K)	m (Kg/h)	M (Kg/mol)	Q (J/h)
A l'entrée	749	29,49	0,044	0,0345	28170,215
A la sortie	587	28,82	0,044	0,0345	21575,738



$$Q_{deg} = 6594,477 \text{ J/h}$$

La quantité de chaleur gagnée par le gaz froid

$$Q_{rec} = Q_2' - Q_1'$$



$$Q_{rec} = \left(\frac{\dot{m}'}{M'} \times C_{p1}' \times T_1' \right) - \left(\frac{\dot{m}'}{M'} \times C_{p2}' \times T_2' \right)$$



Avec :

- Q_1' : la quantité de chaleur du gaz froid à l'entrée de l'échangeur (J/h).
- Q_2' : la quantité de chaleur du gaz froid à la sortie de l'échangeur (J/h).
- \dot{m}' : débit massique du gaz froid à l'entrée et la sortie de l'échangeur (Kg/h) (conservation de matière).
- M' : masse molaire du gaz froid (Kg/mol).
- C_{p1}' et C_{p2}' : sont respectivement les chaleurs spécifiques du gaz froid à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (J/mol/°K).
- T_1' et T_2' : sont respectivement les températures théoriques du gaz froid à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (°K).

En effet le gaz froid à l'entrée et à la sortie de l'échangeur se compose de: SO_2 , SO_3 , N_2 et O_2 avec des fractions molaires (X_n) différentes.

Tableau 6: caractéristiques du fluide froid circulant dans l'échangeur E03 à gaz/gaz

Composé	C_p' (J/mol/K)	X_n' (%)	Masse Molaire (Kg/mol)
SO_2	$15,29 + 0,00326T + 50000/T^2$	0,009	0,064
SO_3	$15,29 + 0,00326T + 50000/T^2$	0	0,080
N_2	$27,88 + 0,00427T$	0,948	0,028
O_2	$29,97 + 0,004185T - 167400/T^2$	0,043	0,032

D'après le tableau précédant on a calculé la chaleur spécifique de chaque composé et la multiplié par sa fraction molaire correspondante, puis on a réduit la chaleur spécifique du mélange faisant la somme des chaleurs spécifiques précédentes, et on a obtenue les résultats suivants :

Tableau 7 : Calcul des caractéristiques du fluide froid circulant dans l'échangeur E03 à gaz/gaz

Gaz froid	T' (K)	C_p' (J/mol/K)	\dot{m}' (Kg/h)	M' (Kg/mol)	Q' (J/h)
-----------	----------	------------------	-------------------	---------------	------------



A l'entrée	289	29,01	0,018	0,028	28170,215
A la sortie	569	30,26	0,018	0,028	21575,738

→ $Q_{\text{rec}} = 5679,058 \text{ J/h}$

Et donc la quantité de perte de chaleur on peut la déduire selon l'équation suivante :

→
$$Q_{\text{perte}} = Q_{\text{deg}} - Q_{\text{rec}}$$
$$Q_{\text{rec}} = 915,419 \text{ J/h}$$

Ainsi que l'efficacité thermique de l'échangeur E03 est représentée par l'équation suivante :

→
$$E_1 = (T_{\text{ce}} - T_{\text{cs}}) / (T_{\text{ce}} - T_{\text{fe}})$$
$$E_1 = 41\%$$

III- PROFIL DE LA VARIATION DE LA QUANTITE D'ECHANGE ET DE PERTE DE CHALEUR DE L'ECHANGEUR E03 PENDANT 2013-2014

1- La variation de quantité de chaleur dégagée par le gaz chaud

On a établi la variation de la quantité de chaleur dégagée par le gaz chaud pendant le cycle 2013/2014 [voir annexe 4] et on a obtenue la courbe suivante

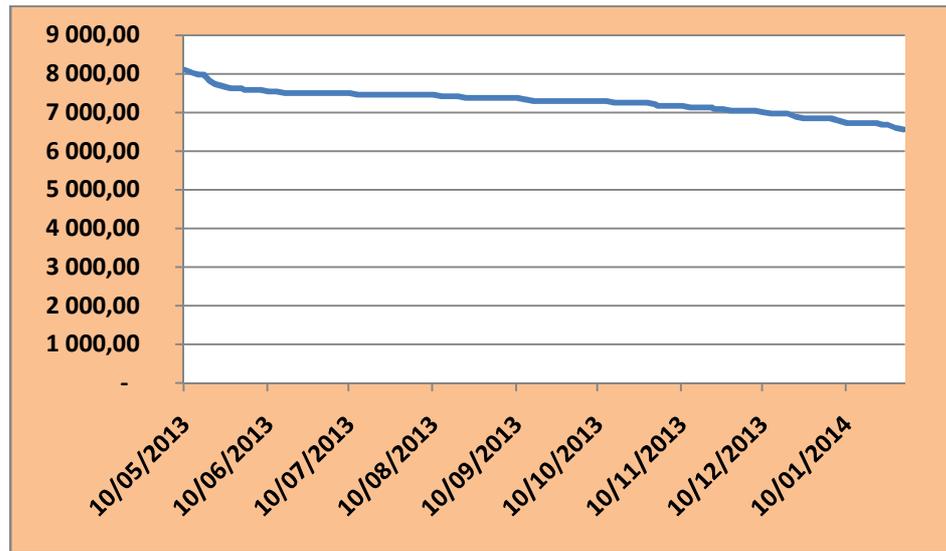


Figure 9: la variation de la quantité d'échange dégagée par le gaz chaud de l'échangeur E03 pendant un an [annexe 4]

D'après cette courbe on a constaté que la quantité de chaleur dégagée par le gaz chaud diminue selon l'année.

2- La variation de quantité de chaleur gagnée par le gaz froid

Par la suite on a établi la variation de la quantité de chaleur reçue par le gaz froid pendant le cycle 2013/2014 [voir annexe 5] et on a obtenue la courbe suivante

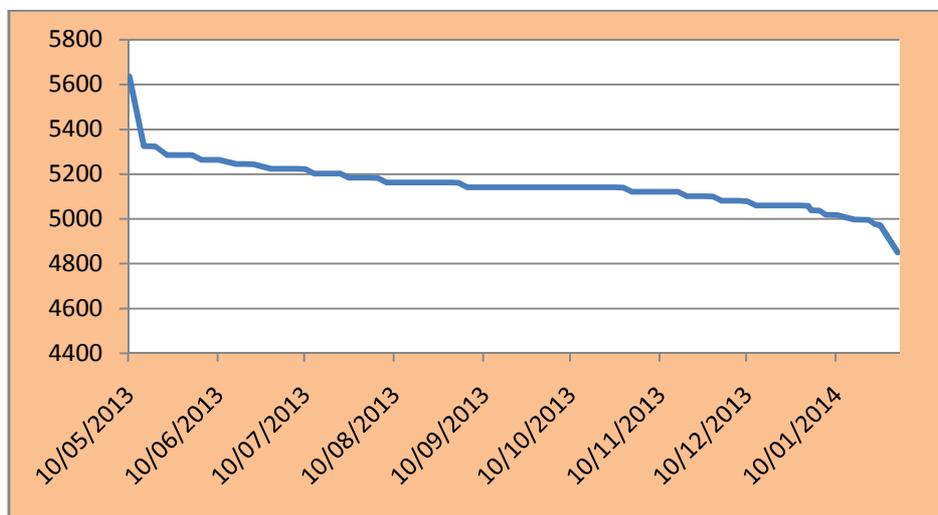


Figure 10: la variation de la quantité d'échange dégagée par le gaz chaud de l'échangeur E03 pendant un an [annexe 5]

D'après cette courbe on a constaté que la quantité de chaleur reçue par le gaz froid diminue selon l'année.



3- La variation de quantité de perte de chaleur

De même on a établi la variation de la quantité de perte de chaleur pendant le cycle 2013/2014 [voir annexe 6] et on a obtenue la courbe suivante :

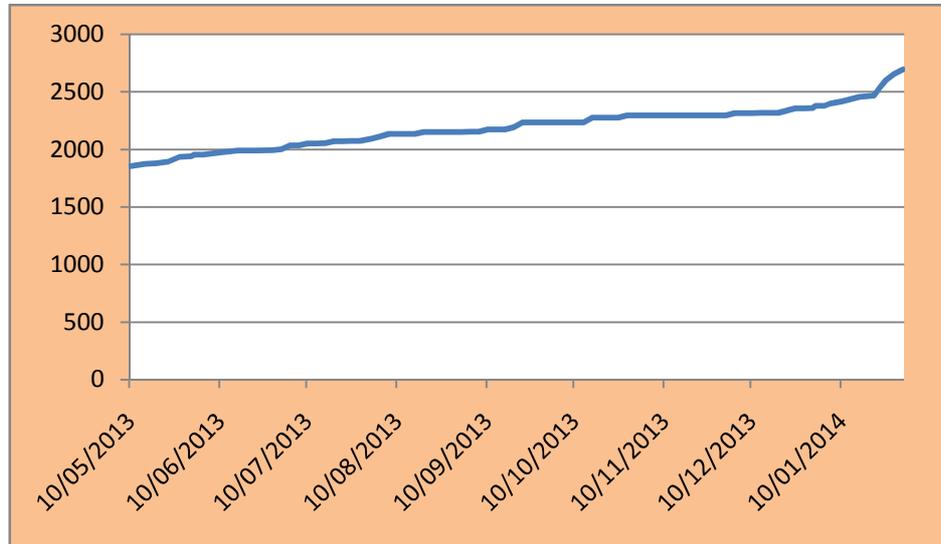


Figure 11: la variation de la quantité de perte de charge de l'échangeur E03 pendant un an [annexe 6]

D'après cette courbe on a constaté que la quantité de perte de chaleur augmente selon l'année.

4- Interprétation

D'après les courbes précédentes on a constaté que les quantités de l'échange thermique selon l'échangeur E03 diminue par contre la quantité de perte de chaleur augmente durant le temps, que peut signifie l'existence des pertes de charge à cause du phénomène d'encrassement, et donc par la suite influence sur l'échange thermique et détérioration de l'efficacité de l'échangeur.

IV- ETUDE DE L'EFFICACITE DE L'ECHANGEUR E03 AU COURS D'UNE ANNEE

On a établi la variation de l'efficacité thermique de l'échangeur E03 pendant le cycle 2013/2014 [voir annexe 6] et on a obtenue la courbe suivante

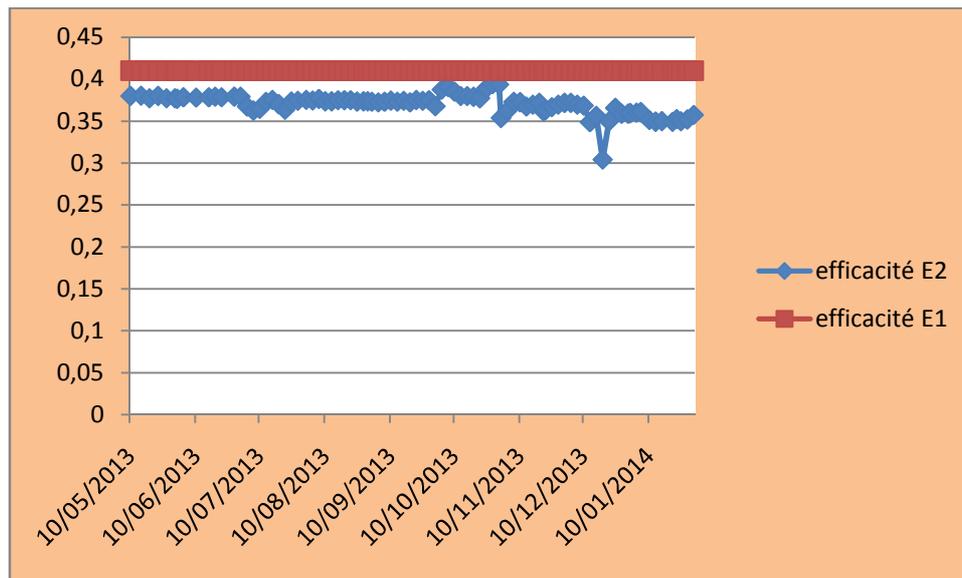


Figure 12: Profil de l'efficacité de l'échangeur au cours d'un an [annexe 6]

On remarque que l'efficacité de l'échangeur E03 est de l'ordre de 38%. Le profil de l'efficacité est stable sauf qu'il présente quelque déviation dans les points suivants :

- Le 04/07/2013, unité en production avec réduction de la cadence de 96%.
- Le 007/07/2013, unité en production avec réduction de la cadence de 96%.
- Le 01/11/2013, unité en production avec réduction de la cadence de 98%.
- Le 19/12/2013, unité en production avec réduction de la cadence de 92%.

V- ACTIONS POUR AMELIORER L'EFFICACITE THERMIQUE DE L'ECHANGEUR

Ces dépôts sont de type sulfates de fer qui se dépose sur les parois des tubes, qui fait augmenter les pertes de chaleur et donc une perturbation de l'installation.

Pour ce phénomène on fait appel au nettoyage chimique qui consiste à nettoyer par le haut de l'échangeur par projection d'une solution de l'eau + inhibiteur de corrosion de l'acide sulfurique + bicarbonate de soude, avec une valeur de pH conforme au lavage en mesurant la valeur de pH à la sortie de l'échangeur jusqu'à atteindre la valeur désirée qui peut nous aider de savoir est ce que le lavage est déterminé. Ce lavage permet d'éliminer le plus gros des sulfates de fer et neutraliser les surfaces.

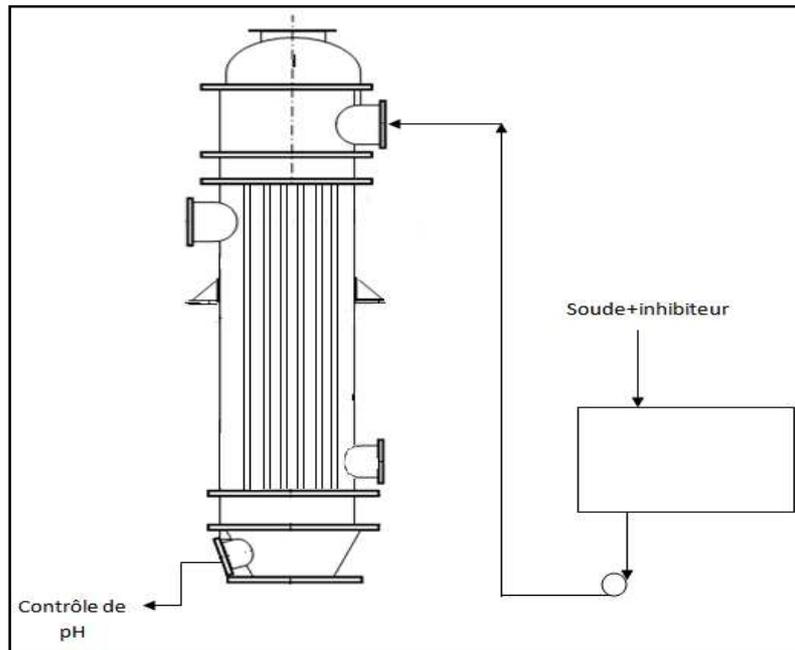


Figure 13: nettoyage chimique de l'échangeur E03

VI- PROPOSITION

Après La détection de ce phénomène l'échangeur doit passer à une opération de lavage qui se fait par la circulation de l'eau chaude.

Le phénomène d'encrassement dans les échangeurs thermiques est un sujet d'actualité. En effet, l'encrassement résulte de la boue causée par des suspensions insolubles, de la rouille causée par la corrosion et pour finir d'un dépôt. Tout ceci, s'il est pris à temps, peut être nettoyé à moindre coût. On ne peut pas se permettre non plus une fréquence de nettoyage trop grande, cela augmenterait les coûts de production des usines par des pertes de productions dues aux arrêts nécessaires au nettoyage ou par une augmentation des coûts d'entretien. Mais à l'inverse, si on ne prend pas en compte le phénomène d'encrassement dans les échangeurs thermiques, il y aura une augmentation des pertes énergétiques, une hausse de la consommation de l'eau, de l'électricité et de carburant - ce qui apportera aussi un impact sur l'environnement dû à une augmentation de CO₂. Mais pour des gros échangeurs thermiques où l'accessibilité est réduite il est difficile de savoir si celui-ci est encrassé ou non.

En effet, les méthodes utilisées le plus couramment pour détecter l'encrassement reposent sur l'utilisation de capteurs spécifiques souvent coûteux et ne permettant qu'une détection



localisée, sur la mesure de la variation de masse de l'échangeur ou de l'efficacité de l'échangeur à travers le coefficient de transfert – ces deux dernières méthodes exigeant des conditions de fonctionnement très particulières : l'arrêt pour la première et un fonctionnement en régime permanent pour la seconde. Ces méthodes se révèlent donc restrictives et coûteuses d'où le sujet de la thèse qui rentre en jeu et qui consiste à détecter l'encrassement dans les échangeurs thermiques suffisamment tôt pour mettre en place un système d'entretien. Il existe de nombreuses méthodes permettant la détection de défauts telles que des techniques de reconnaissances de formes, de classification ou encore des techniques nécessitant un modèle du processus. C'est cette dernière méthode que nous allons développer par l'intermédiaire d'observateurs non linéaires.



CONCLUSION

Le projet de fin d'études que j'ai réalisé consiste à faire une étude de l'efficacité de l'échangeur de chaleur 101FE03 afin d'améliorer l'état de cet échangeur. Et Pour arriver à élaborer ce travail, nous avons adopté le bilan thermique et la variation de l'efficacité selon l'année 2013/2014, qui se base sur l'approche processus et qui mène à sa sortie à la disponibilité des équipements.

Dans notre cas l'encrassement de l'échangeur 101FE03 est de type encrassement par réaction chimique, On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent une polymérisation ; il en résulte la formation d'un dépôt. Ce dépôt est le sulfate de fer qui se dépose sur les ailettes des tubes pour former un dépôt solide de couleur blanche. ce phénomène de sulfatation, qui fait augmenter les pertes de chaleur donc la perturbation de l'installation c'est pourquoi on doit s'assurer qu'à chaque arrêt le nettoyage soit bien fait, ou de redimensionner l'échangeur avec prise d'une résistance d'encrassement plus grande.

Pour réaliser l'étude de l'efficacité de l'échangeur E03 l'étape la plus difficile était la collection des données physique ou chimique des deux fluides ainsi que les propriétés physique du matériel de construction des tubes, ce qui m'a poussé à faire des approximations pour faire les calculs.

Enfin, notre projet au sein du group OCP (office chérifien des phosphates), nous a donné l'opportunité de découvrir le monde de l'industrie chimique, ainsi que de travailler sur un sujet industriel. Le travail réalisé s'est avéré très enrichissant pour notre expérience professionnelle aussi bien ce qui concerne le domaine technique que l'aspect humain. Le fait de collaborer avec du personnel de différents services nous a permis d'avoir une vision plus détaillée aussi sur notre sujet de stage que sur le procédé industriel mais également d'acquérir des compétences professionnelles, telle que le travail en équipe l'ouverture d'esprit et la rigueur, de plus on a pu appliquer nos connaissances théoriques et en approfondir d'autres notamment.

Bibliographie



- [1] : Sabrina, Delrot, « Détection d'encrassement dans les échangeurs thermiques par observateurs de type Takagi-Sugeno », Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH), 2012.
- [2] : Laetitia PEREZ, « Développement, étude de performances et intégration de sondes thermiques pour la Caractérisation de l'encrassement des échangeurs tubulaires à courants croisés », Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers-Centre de Bordeaux, 2003.
- [3] : Hamza Chérif SADOUK, « Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois », Ecole doctorale : Information, Communication, Modélisation, Simulations (ED n° 431), 2009.
- [4] : manuel de Descriptif Technique Définitif, « G-OCP-INDO MAROC PHOSPHORE-IMACID», 2013
- [5] : E. ROULAND, « les échangeurs de chaleur » GSI-M1-2011-2012