



Année Universitaire : 2016-2017

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 D'EFFICACITE DE LAVEUR DES GAZ AU SEIN DE
L'UNITE DE PRODUCTION D'ACIDE PHOSPHORIQUE ET
OPTIMISATION DE SA CONFIGURATION**

Présenté par :

BOUKRIES Naoufal

Encadré par :

- Mr.MOUSSAOUI Hanafi
- Mr.SOUHA Hammou FST Fès

Soutenu Le 16 Juin 2016 devant le jury composé de :

- Pr.SOUHA Hammou
- Pr.IDRISSI Kandri Nouredine
- Pr.EL GHAZOUALI Ahmed

Stage effectué à : Office chérifien du phosphate (OCP)



Dédicaces

Comme symbole d'une profonde reconnaissance et d'une gratitude égale, je dédie ce travail.

A mes parents

Je suis profondément reconnaissant pour tous vos efforts, vos encouragements et votre soutien tout au long de mon parcours.

A mes sœurs

Auxquels je dois, du fond du cœur, une profonde gratitude, de m'avoir encouragé et tendu mains fortes tout le temps.

Et A tous ceux qui me sont chers...

REMERCIEMENT

Avant tous, je tiens à remercier le tout puissant, généreux et miséricordieux, ALLAH, qui m'a tendu la santé et la chance d'étudier, et le prions de nous guider pour la réussite dans notre vie.

A l'issue de ce travail effectué au sein du Groupe Chérifien des Phosphates (OCP) et spécialement à l'atelier JFC 2, je tiens à exprimer ma haute gratitude et considération à Mr.Hanafi MOUSSAOUI, responsable de l'unité phosphorique et parrain du stage, pour son encadrement, son soutien, sa disponibilité permanente et pour son aide précieuse qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Ma profonde reconnaissance s'adresse aussi à Mr.Hammou SOUHA, mon encadrant pédagogique, qui m'a permis de mener à bien mon projet de fin d'études grâce à son soutien et sa collaboration.

Mes remerciements vont aussi à Mr. ZAD, Mr. Abdelfatah BAZTAMI, Mr. Redouane ZIANE, Mr. Abdellah NAKHLA pour leurs conseils, leurs directives fructueuses et l'aide qu'ils m'ont apporté pour mener à bien mon profitable stage.

Je ne saurais oublier dans mes remerciements les agents de l'unité phosphorique pour leur chaleureux accueil, leur aide et leur contribution positive à ce travail.

Que tout le personnel de l'unité de production d'acide phosphorique, ayant contribué d'une manière ou d'une autre dans la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Liste des figures

Figure 1: Carte du groupe OCP	4
Figure 2 : Entités situées dans le site de Jorf Lasfar.....	6
Figure 3 : Schéma général de l'entité JFC 2.....	7
Figure 4 : Schéma bloc de la production d'acide sulfurique.	8
Figure 5 : Schéma du circuit vapeur	8
Figure 6 : Etapes de fabrication des engrais	9
Figure 7 : Section d'épaississement.....	12
Figure 8 : Cuve d'attaque et cuve de maturation	13
Figure 9 : Filtre à cellules basculantes	15
Figure 10 : Stocke d'acide dilué	15
Figure 11 : Echelon de concentration	16
Figure 12 : Stocke d'acide concentré	17
Figure 13 : Laveur des gaz SCRUBBER.....	17
Figure 14 : Mécanisme de l'absorption au sein du laveur	20
Figure 15 : Ecoulement à co-courant	20
Figure 16 : Ecoulement à contre-courant	21
Figure 17 : Ecoulement à courant-croisé	21
Figure 18 : Population de gouttelettes en amont et en aval des dévésiculeurs	22
Figure 19 : Schéma des circuits d'eau et de fumée du laveur	24
Figure 20 : Schéma du 1er et 2ème compartiment du laveur	25
Figure 21 : Schéma du 3ème compartiment du laveur	26
Figure 22 : Schéma du 4ème compartiment du laveur	26
Figure 23 : Schéma du 5ème compartiment du laveur	27
Figure 24 : Schéma du bilan Fluor par rapport chaque compartiment	33
Figure 25 : Schéma du bilan P ₂ O ₅ par rapport chaque compartiment	33
Figure 26 : Schéma du bilan Fluor et P ₂ O ₅ par rapport la totalité de l'équipement.....	34
Figure 27 : Etude graphique des effets	39
Figure 28 : Effets de Pareto individuels.....	40
Figure 29 : Effets Pareto cumulés.....	40
Figure 30 : Etude graphique des effets	43
Figure 31 : Effets de Pareto individuels.....	44
Figure 32 : Effets Pareto cumulés.....	44
Figure 33 : Etude graphique des effets	45
Figure 34 : Effets de Pareto individuels.....	46
Figure 35 : Effets Pareto cumulés.....	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Débits volumiques d'eau à l'entrée du laveur	29
Tableau 2 : Densité d'eau à l'entrée du laveur	29
Tableau 3 : Débits massiques d'eau à l'entrée du Laveur	29
Tableau 4 : Débits volumiques d'eau à la sortie du laveur	30
Tableau 5 : Densité d'eau à la sortie du laveur	30
Tableau 6 : Débits massiques d'eau à la sortie du laveur	30
Tableau 7 : Titres massiques en Fluor dans l'eau entrante	31
Tableau 8 : Titres massiques en Fluor dans l'eau sortante	31
Tableau 9 : Titres massiques en P ₂ O ₅ dans l'eau entrante	31
Tableau 10 : Titres massiques en P ₂ O ₅ dans l'eau sortante	31
Tableau 11 : Températures d'eau à l'entrée du laveur	35
Tableau 12 : Températures d'eau à la sortie du laveur	35
Tableau 13 : Capacité thermique massique de l'eau	36
Tableau 14 : Capacité thermique massique du gaz	36
Tableau 15 : Facteurs et niveaux	38
Tableau 16 : Réponses des pertes de charge	39
Tableau 17 : Facteurs et niveaux	42
Tableau 18 : Résultats des essais	43

Nomenclature et liste des abréviations

SYMBOLE	DESIGNATION
OCP	Office chérifien des phosphates
PMP	Pakistan Maroc Phosphore
BMP	Bunge Maroc Phosphore
IMACID	Indo Maroc Phosphore
EMAPHOS	Europe Maroc Phosphore
JFC	Jorf Fertilizer Company
ODI	Owner Direct Investment
SA	Société anonyme
DAP	diammonium phosphate
L	Débit liquide
X	Titre massique dans le liquide
V	Débit gaz
Y	Titre massique dans le gaz
ρ	Masse volumique
R	Rendement chimique
H	Rendement thermique
Q	Quantité de chaleur
Cp	Capacité thermique massique
T	Température

Table des matières

<i>INTRODUCTION GÉNÉRALE</i>	1
Chapitre 1 : Présentation générale du groupe OCP	3
I. Sites du groupe OCP	4
II. Historique du groupe OCP	4
III. Statut Juridique.....	5
IV. Présentation du pôle chimie jorf lasfar [3]	5
V. Présentation des unités de l'entité JFC 2 [1]	6
Chapitre 2 : Description du procédé de fabrication d'acide phosphorique	10
I. Matières premières	11
II. Equipements principaux de l'unité.....	11
III. Procédé de fabrication.....	11
Chapitre 3 : Description détaillée du fonctionnement du SCRUBBER	18
I. Rôle de l'opération	19
II. Caractéristiques du liquide de lavage	19
III. Description de l'équipement.....	19
IV. Principe de l'opération	19
Chapitre 4 : Efficacité du laveur des gaz SCRUBBER	23
I. Bilan matière	24
1. Introduction et mise en équation	24
2. Détermination des paramètres inconnus.....	29
II. Rendement chimique de l'équipement	34
III. Bilan énergie.....	34
1. Introduction et mise en équation	34
2. Détermination des paramètres inconnus.....	35
IV. Rendement thermique de l'équipement.....	36
Chapitre 5 : Etude des pertes de charge au niveau du SCRUBBER	37
I. Description de l'étude	38
II. Construction du plan d'expérience.....	38
III. Stratégie d'étude.....	38
IV. Analyse des résultats	39
Chapitre 6 : Optimisation des configurations du laveur des gaz SCRUBBER	41

I. Description de l'étude	42
II. Stratégie d'étude.....	42
III. Analyse des résultats	43
IV. Conclusion.....	47
<i>Conclusion générale</i>	48
<i>Références Bibliographiques</i>	49
<i>Annexes</i>	I

INTRODUCTION GENERALE

La protection de l'environnement est perçue dans le monde en général et au Maroc en particulier, de plus en plus, comme une composante importante d'un développement global et durable, répondant à l'aspiration des populations à une meilleure qualité de vie.

Cette perception s'est matérialisée au Maroc, dans le domaine de la transformation des phosphates, par le biais du groupe OCP, par un ensemble d'actions visant à réduire les émissions des composés polluants en apportant des améliorations aux installations existantes et l'introduction de nouveaux procédés moins polluants.

Dans l'unité de production d'acide phosphorique, le lavage des gaz s'avère une opération d'une importance stratégique, vu qu'elle concerne la limitation de certains produits nuisibles à l'environnement dans l'atmosphère, la récupération des pertes en matière ainsi que la valorisation de la chaleur portée par le gaz.

Le présent travail consiste, donc, à diagnostiquer la section de lavage de l'unité d'acide phosphorique en vue de déceler les voies possibles dans l'optique d'optimiser, d'avantage, l'opération de captage de P_2O_5 et du fluor d'une part, et d'autre part de déterminer les échanges thermiques.

Le présent rapport récapitule le travail réalisé tout au long de notre projet de fin d'études. Il est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une brève présentation du groupe OCP et particulièrement de l'entité JFC 2 ;

Le deuxième chapitre est dédié à une présentation détaillée du procédé JACOBS de production d'acide phosphorique dans la ligne P2 lieu de déroulement de mon stage de fin d'études ;

Une description détaillée du fonctionnement du laveur des gaz, le principe qui régit dedans, ainsi que le mécanisme du lavage est présentée dans le troisième chapitre ;

Le quatrième chapitre est consacré à une étude d'efficacité dans laquelle nous avons établi les bilans et les rendements du laveur des gaz ;

Le cinquième chapitre concerne une étude sur les paramètres influençant négativement, positivement ou n'ont aucun effet sur les pertes de charge au niveau du laveur ;

Le sixième chapitre est dédié à l'optimisation des paramètres de marche du laveur pour une possibilité d'améliorer l'opération de lavage ;

Nous terminerons ce rapport par une conclusion qui rassemble les points forts de ce travail, ainsi que des perspectives afin de prolonger ce travail.

Chapitre 1 : Présentation générale du groupe OCP

I. Sites du groupe OCP

Le Groupe est présent dans cinq zones géographiques du pays dont trois sites d'exploitation minière : Khouribga, Benguérir/Youssoufia, Boucraâ/Laâyoune et deux sites de transformation chimiques : Safi et Jorf Lasfar.

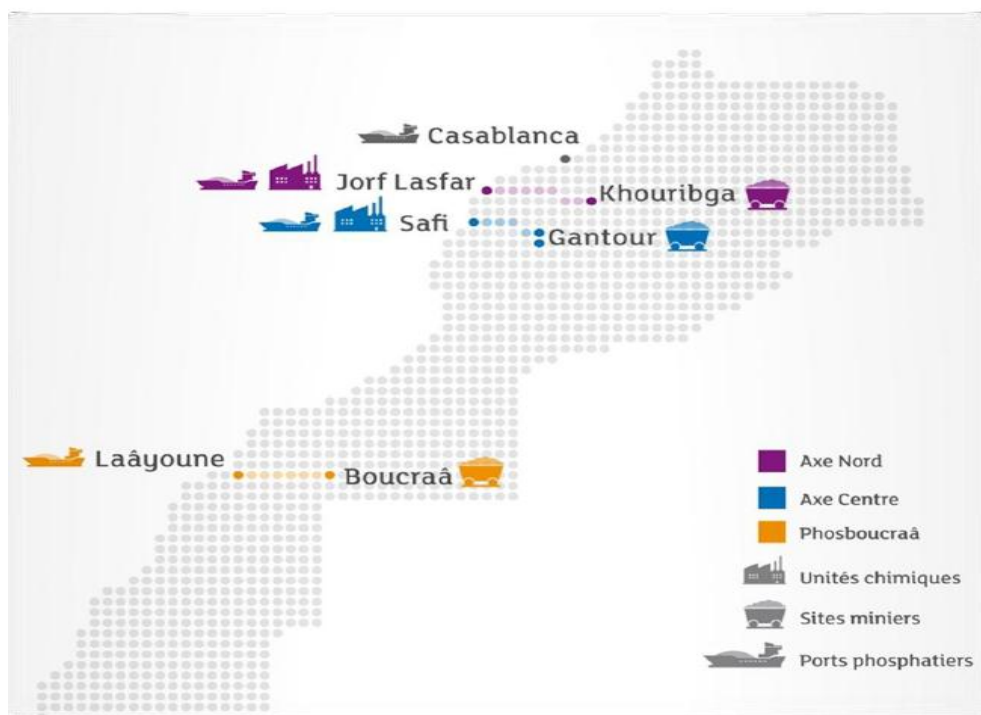


Figure 1: Carte du groupe OCP

II. Historique du groupe OCP

L'Office Chérifien des Phosphate fut créé au 7 août 1920 par dahir, le dahir réservera à l'état tous les droits de recherche et d'exploitation du phosphate, ainsi que Le monopole des ventes de ce minerai sur le marché. L'exploitation effective du minerai ne fut entreprise qu'en 1921 dans la région de Oued Zem. Dès cette période, l'OCP a connu une très vive expansion sans relâche grâce à la qualité du minerai extrait et à l'apprésentation des pays demandeurs.

Malheureusement, cette expansion fut interrompue brusquement à cause de la chute des prix sur le marché mondial, ce qui conduira l'état ainsi que l'OCP à revoir leur qualité jusqu'à ce temps basé sur les entrées en devises issues en vue d'éviter d'autres crises.

L'OCP a commencé une très large industrialisation avec son activité et a créé des usines pour les dérivées du phosphates (acide phosphorique, fertilisants, etc....), ce qui constituera le noyau du groupe OCP.

Cependant, en ces dernières années, l'activité a repris grâce au dynamisme que connaît le groupe actuellement, et en développement du partenariat avec les pays importateurs

manifestes en créant des entreprises mixtes, et comme cité avant, grâce à la diversification de l'activité pour passer de l'extraction pure et simple du pays et au faible coût d'exploitation.

Le groupe OCP livre aux cinq continents de la planète ; ses exportations représentent 25 à 30% du commerce international du phosphate et de ses dérivés présents dans cinq zones géographiques développement régional et national important du pays (3 sites d'exportations minières : Khouribga-Youssoufia, Boucraa-Laayoun et deux sites de transformation chimique : Jorf lasfar et Safi).

III. Statut Juridique

Le groupe OCP a été constitué sous la forme d'un organisme d'État avec une gestion autonome. Mais étant donné le caractère de ses activités commerciales et industrielles, il est doté d'une organisation lui permettant d'agir avec les mêmes mécanismes privés.

L'OCP fonctionne ainsi comme une société dont le seul actionnaire est l'État il est dirigé par une Direction Général nommé par Dahir. Le conseil d'administration est présidé par le premier Ministre. En ce qui concerne la gestion financière, elle est entièrement séparée de celle de l'État.

Chaque année, L'OCP établit son bilan, son compte d'exploitation et ses prix de revient comme les entreprises privées. L'OCP est inscrit aussi au registre du commerce et soumis sur le plan fiscal aux mêmes obligations que n'importe quelle entreprise privée (patente, droits de douane, taxes à l'exploitation, impôts sur les salaires, impôts sur les bénéfices, ... etc.).

Toutefois, cet organisme a connu, une certaine tendance vers des partenariats étrangers (IMACID, EMAPHOS et PAKPHOS).

IV. Présentation du pôle chimie jorf lasfar [3]

Après le complexe industriel MAROC PHOSPHORE I et II à Safi, le groupe OCP a décidé de réaliser le complexe industriel MAROC PHOSPHORE III-IV à Jorf Lasfar pour doubler sa capacité de valorisation des phosphates. Ce complexe qui a démarré en 1986, permet de produire annuellement 2 millions de tonnes de P_2O_5 sous forme d'acide phosphorique, nécessitant la transformation d'environ :

- 7,7 millions de tonnes de phosphates extrait des gisements de Khouribga ;
- 2 millions de tonnes de soufre ;
- 0,5 million de tonnes d'ammoniac.

Le site Jorf Lasfar s'étend sur une superficie d'environ 1700 ha, à 20 km d'El Jadida. Le choix de cet emplacement a pris en considération la position stratégique de la région :

- Proximité des zones minières permettant son alimentation en phosphate (Khouribga) ;

- Existence d'un port ;
- Disponibilité de l'eau de mer et de l'eau douce ;
- Disponibilité de terrains pour les extensions futures.

Avec la croissance accrue en demande de phosphate et ses dérivés, le groupe OCP a fait un pas géant en créant des joint-ventures avec des groupes industriels internationaux et qui sont présentées comme suit :

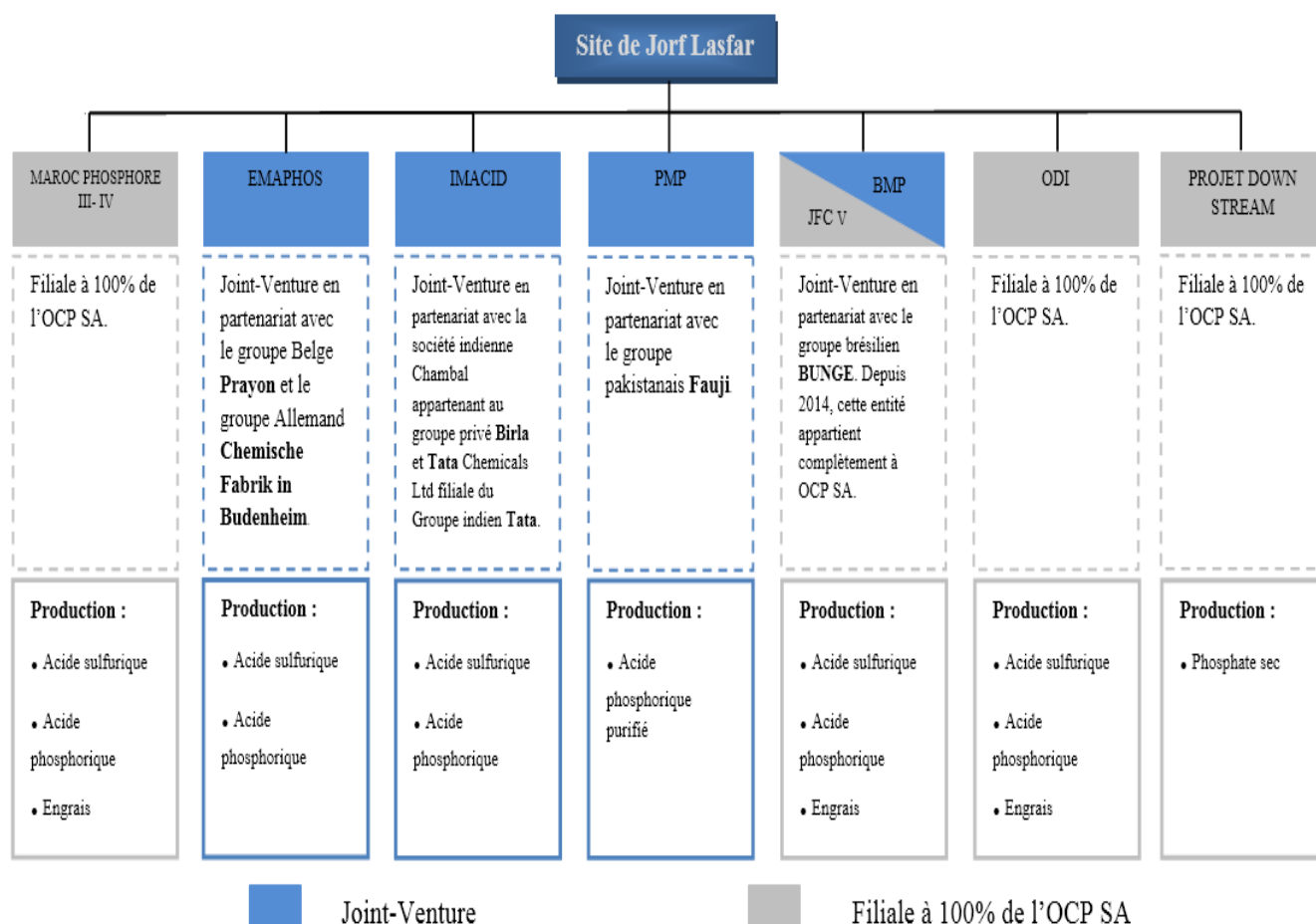


Figure 2 : Entités situées dans le site de Jorf Lasfar

V. Présentation des unités de l'entité JFC 2 [1]

L'usine JFC2 est une unité de production des engrais DAP de capacité 1Mt/an.

Elle est construite dans le but de répondre à la demande du marché en Engrais suivant la stratégie du groupe OCP.

L'usine JFC1 se compose des unités suivantes :

- Unité de Production d'acide sulfurique et centrale thermique
- Unité de Production d'acide phosphorique
- Unité de Production des engrais

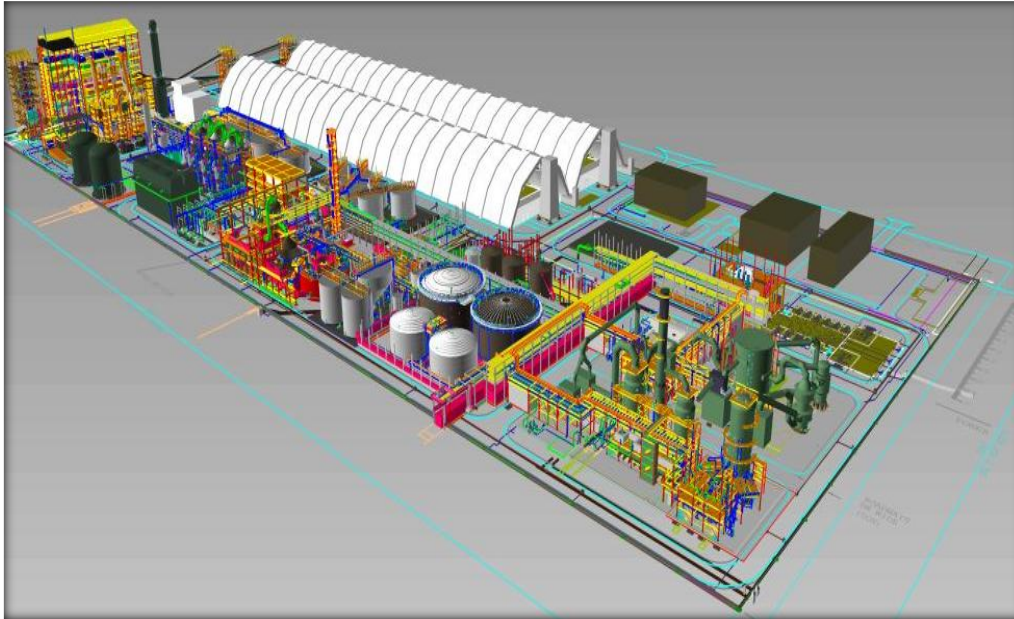


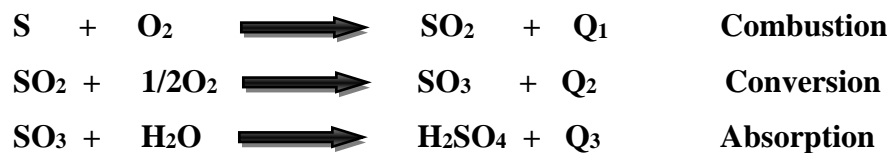
Figure 3 : Schéma général de l'entité JFC 2

1. Unité de production d'acide sulfurique et centrale thermique

Cet unité sulfurique se compose d'une seule ligne conçue à fabriquer l'acide sulfurique à 98,5% et de la vapeur à haute pression (60bars), destinés principalement à la fabrication de l'acide phosphorique et à l'énergie électrique.

- **Capacité** : 4200 TMH/jour ;
- **Procédé** : JACOBS.

Les principales réactions de synthèse de H₂SO₄ :



Avec :

Q₁, Q₂, Q₃ : Respectivement les quantités de chaleur dégagée pendant chaque réaction

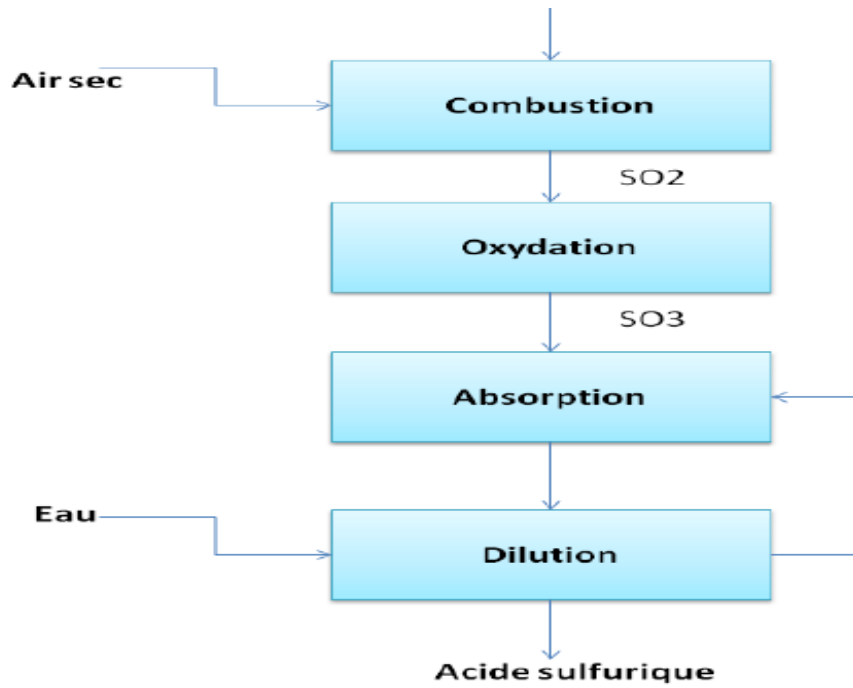


Figure 4 : Schéma bloc de la production d'acide sulfurique.

La centrale thermique est destinée à la production de l'énergie électrique par laquelle il alimente les autres ateliers. Il est composé de :

- Centrale thermoélectrique de capacité de 66 MW

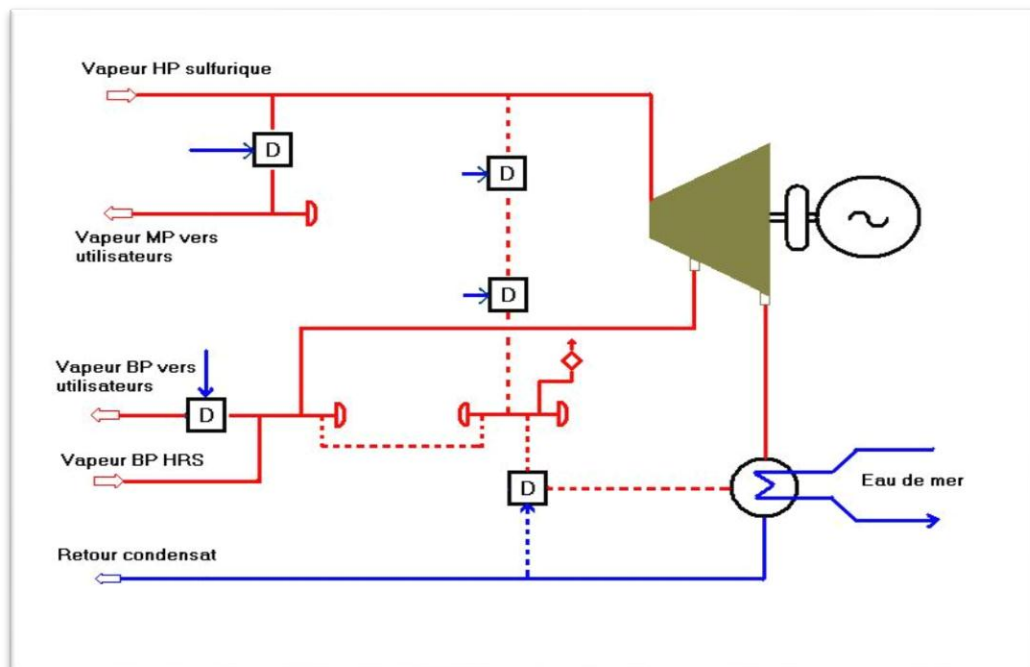


Figure 5 : Schéma du circuit vapeur

2. Unité de production d'acide phosphorique

C'est l'unité central de l'entité, vers lequel convergent les produits et les services des autres unités pour assurer la production d'acide phosphorique à 28% et 54% en P₂O₅.

Les principales caractéristiques de l'unité phosphorique sont :

- **Capacité nominale** : 450.000 tonnes de P₂O₅ par an d'acide ;
- **Procédé** : JACOBS ;

3. Unité de production des engrais

Cette unité se compose d'une seule ligne conçue à fabriquer des engrais DAP

- **Capacité nominale** : 1.000.000 T/an ;
- **Procédé** : JACOBS ;

Elle est composée des sections suivantes :

- Attaque : acide phosphorique 54% P₂O₅+l'ammoniac gaz
- Lavage des gaz
- Granulation de la bouillie
- Séchage du produit
- Criblage +recyclage du refus
- Section de refroidissement
- Enrobage du produit fini
- Cyclonage (dépeussierage)
- Stockage et expédition

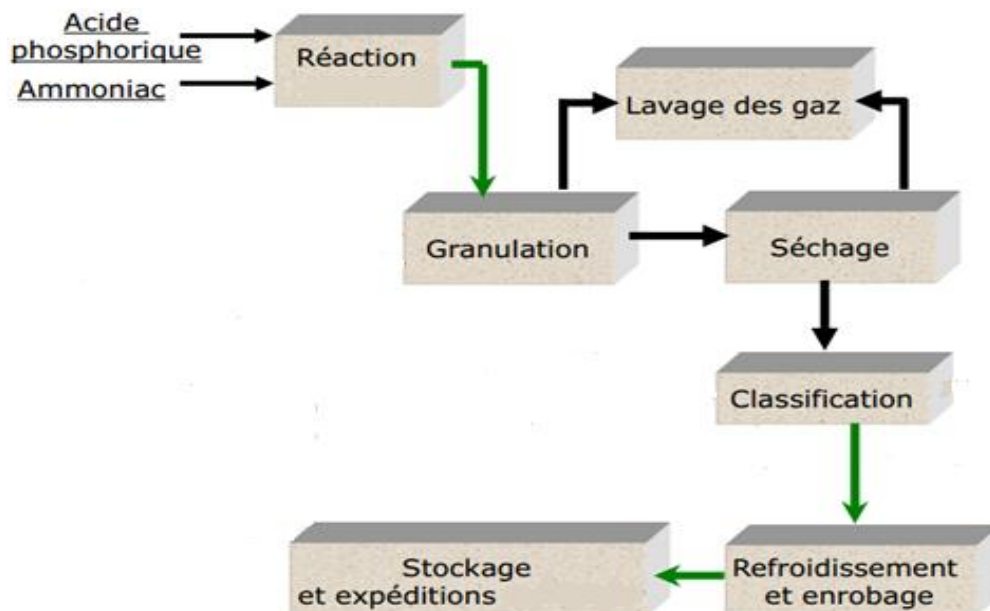


Figure 6 : Etapes de fabrication des engrais

Chapitre 2 : Description du procédé de fabrication d'acide phosphorique

I. Matières premières

La préparation de l'acide phosphorique se fait à partir des matières suivantes :

- Le phosphate humide 65% de solide, 31,12% de P_2O_5
- L'acide sulfurique 98,5%, densité 1,81
- L'eau brute

A noter aussi que cette préparation à besoin des autres produits comme :

- La vapeur basse pression
- L'énergie électrique
- L'air de service et instrument
- Le flocculant et anti-mousse
- L'eau de mer

II. Equipements principaux de l'unité

L'atelier phosphorique se compose des unités suivantes :

- Stockage, épaissement, et alimentation de la réaction en pulpe.
- Réaction – filtration – laveur des fumées.
- Stockage et clarification d'acide 28%.
- Concentration acide 54% et distribution des utilités.
- Production du FSA (Acide fluosilicique).
- Stockage et clarification d'acide 54%.
- Tour de refroidissement des eaux de procédé.

III. Procédé de fabrication

La préparation de l'acide phosphorique peut être réalisée par plusieurs voies ou procédés, sauf que la démarche et la nature du traitement à mettre en œuvre diffèrent d'un procédé à un autre. En effet, chaque procédé présente des particularités, et différents paramètres adaptés afin d'atteindre les performances envisagées.

Généralement, nous distinguons entre deux voies de production d'acide phosphorique qui sont : voie thermique et voie humide. En ce qui concerne l'unité JFC2 le procédé adopté est Jacobs qui se base sur la voie humide et l'utilisation de la pulpe de phosphate comme matière première. La production de l'acide au sein de l'usine se fait par plusieurs étapes, dont la description du fonctionnement est nécessaire.

1. Epaississement

Le groupe OCP a installé des pipelines à boues qui ramènent le phosphate à partir de Khouribga jusqu'au terminal situé à Jorf Lasfar pour livrer la suspension de phosphate, pulpe, aux différentes entités du pôle industriel avec un taux de solide arrivant à 50%, la pulpe est livrée dans le bac de réception et maintenue en agitation pour éviter sa décantation, puis pompée par la suite vers l'épaississeur (figure 7) d'une façon tangentielle à travers une gouttière. Au sein de l'épaississeur, la pulpe est diluée en premier lieu avec l'eau claire surnageant, résultant de la décantation, en haut du l'épaississeur en vue d'atteindre un taux de solide de 10 % et par la suite et mélangée avec le floculant. Le but de la dilution est d'augmenter la surface de contact des particules avec le floculant.

La pulpe évacuée est recyclée à l'aide d'une pompe soit vers le haut du l'épaississeur ou vers son bas selon le besoin afin d'atteindre la masse volumique désirée pour le soutirage vers le réacteur qui varie de 1600 à 1700 Kg/m³.

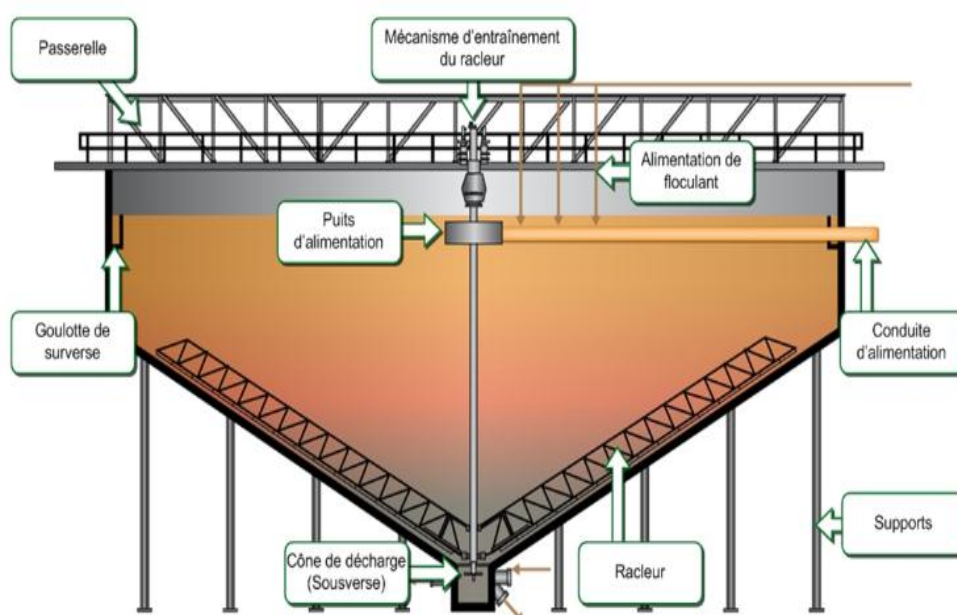


Figure 7 : Section d'épaississement [4]

2. Attaque-maturation

La pulpe est soutirée à l'aide d'une pompe à partir de l'épaississeur et refoulée vers la cuve d'attaque lieu de la réaction (figure 8). Le procédé JACOBS de la ligne P2 est caractérisé par son réacteur annulaire composé de plusieurs compartiments. Il est muni de 7 compartiments qui forment son anneau extérieur, un compartiment central et finalement un compartiment d'alimentation du flash-cooler.

La pulpe de phosphate est introduite dans le compartiment 1 de l'anneau extérieur où elle est attaquée en premier lieu par l'acide phosphorique provenant de la bouillie recyclée se transformant ainsi de phosphate tricalcique en phosphate mono-calcique soluble.

La bouillie est refroidie par la suite de l'ordre de 2°C, en l'introduisant dans un flash-cooler par le biais de deux pompes avec une capacité de refoulement de 9000 m³/h chacune, donc une circulation totale de 18000 m³/h.

Après son refroidissement, la bouillie se divise en deux parties. Un débit de 17000 m³/h retourne au réacteur et le reste rejoint le premier compartiment de la section de maturation, le but de cette zone est d'assurer un temps de séjour additionnel aux cristaux pour murir.

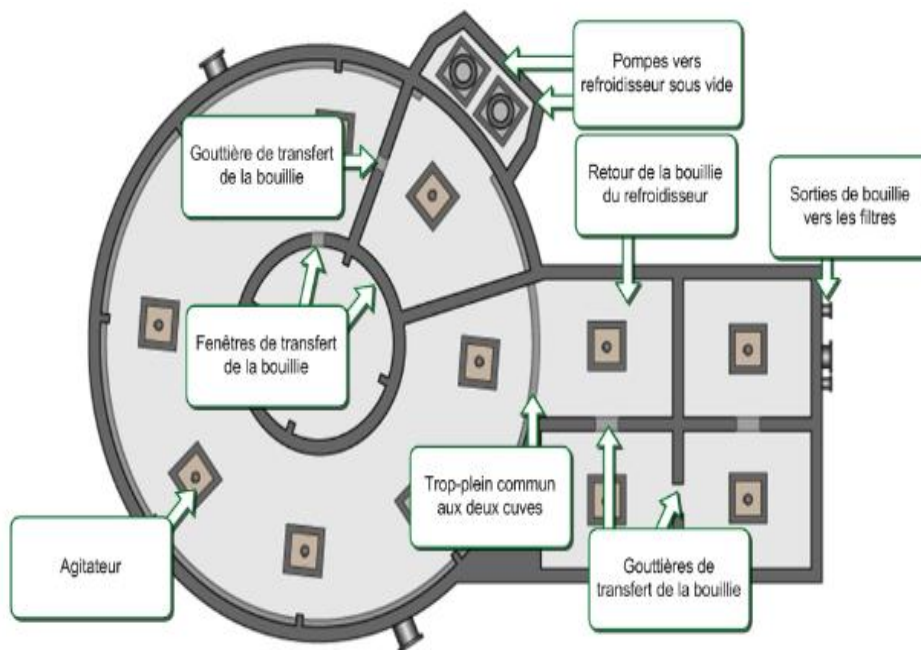


Figure 8 : Cuve d'attaque et cuve de maturation [4]

3. Filtration

La bouillie issue des cuves de maturation est pompée vers deux filtres de type PRAYON pour séparer l'acide phosphorique des cristaux de gypse formés dans la phase d'attaque.

Les filtres PRAYON sont divisés en six secteurs : pré-secteur, secteur fort, secteur moyen, secteur faible, secteur très faible et secteur de lavage des toiles (Figure 9).

▪ Pré secteur

La bouillie arrivant des cuves de maturation est acheminée jusqu'au pré-secteur par le moyen d'une nacelle qui permet sa répartition équitable sur deux cellules du filtre, ce qui permet la formation du gâteau sur la toile filtrante et améliorer la filtrabilité dans le prochain secteur, l'acide soutiré n'est donc pas bien filtré, il rejoindra le circuit d'acide moyen.

▪ Secteur acide fort

A ce niveau le filtrat a une bonne teneur en P_2O_5 , il est appelé acide fort et aspiré via des capillaires vers le stockage d'acide 29%.

- **Secteur acide moyen**

Le gâteau formé à ce stade contient encore des quantités non négligeables de P_2O_5 , donc un lavage du gâteau est indispensable, ce lavage se fait par l'acide faible ce qui donne un acide moyen d'une teneur de 18 à 20% en P_2O_5 qui est recyclé vers la cuve d'attaque pour diluer l'acide sulfurique et favoriser les réactions de production d'acide phosphorique.

- **Secteur acide faible**

Le gâteau subit un autre lavage cette fois par l'acide très faible. Le filtrat obtenu via les capillaires contient encore un faible pourcentage en P_2O_5 et il est réutilisé dans le secteur d'acide moyen.

- **Secteur acide très faible**

Le gâteau est lavé par l'eau gypseuse récupérée dans un bac lors de lavage des toiles et filtré sous vide pour donner l'acide très faible capable de réaliser le lavage de la 3ème filtration.

- **Extraction du gypse**

Le gypse est finalement déchargé, par renversement de la cellule basculante en position inverse, dans une trémie arrosée de l'eau de mer servant à son évacuation vers la mer. Le décollement du gâteau de la toile est facilité par la force de gravitation et aussi grâce à un soufflage.

- **Lavage de toile**

Après l'extraction du gypse, il en reste encore sur la toile, ce reste est lavé par l'eau produite au pré-condenseur. En effet les gaz issus du flash-cooler passent vers le pré-condenseur et préchauffent l'eau de procédé qui sera pompée par la suite vers le bac d'eau servant au lavage des toiles.

- **Séchage des toiles**

Après décharge du gypse et lavage de la toile, celle-ci est séchée au moyen d'un ventilateur pour éliminer l'eau qui reste dans les toiles et qui peut influencer les caractéristiques de l'acide produit.

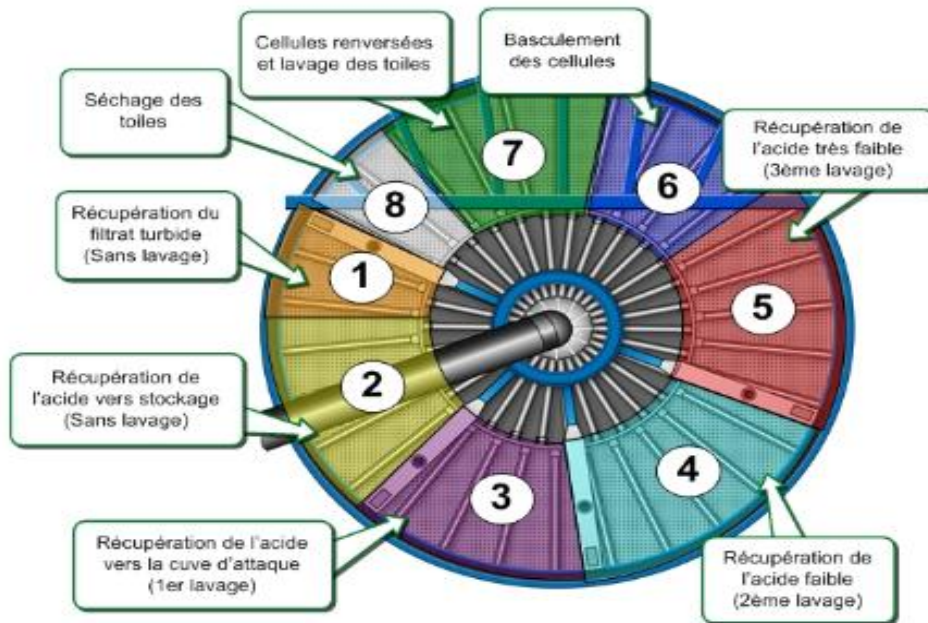


Figure 9 : Filtre à cellules basculantes [4]

4. Stockage d'acide dilué

L'acide phosphorique dilué chaud à clarifier est d'abord refroidi pour provoquer la précipitation des impuretés, après un séjour dans le désursaturateur pour y faire grossir les cristaux, l'acide est acheminé au décanteur pour séparer les solides formés. L'acide refroidi et clarifié est alimenté aux échelons de concentration via le bac intermédiaire, et les boues chargées d'impuretés sont recyclées au procédé.

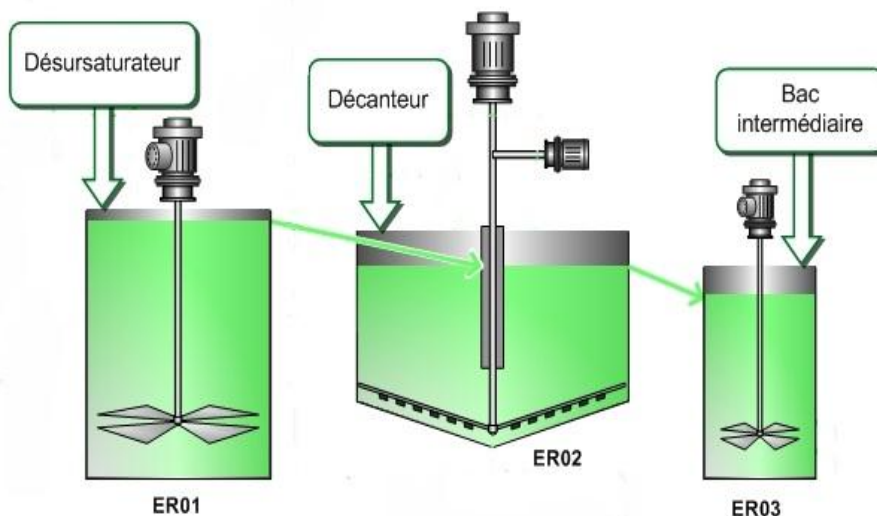


Figure 10 : Stocke d'acide dilué [4]

5. Concentration

La concentration de l'acide dilué s'effectue dans une boucle de circulation (Figure 11), comprenant un bouilleur dans lequel est assurée une circulation importante de l'acide par une pompe de grand débit, un échangeur de chaleur permet de réchauffer l'acide en circulation à l'aide de vapeur. L'acide concentré est ensuite alimenté vers l'unité de stockage de l'acide concentré.

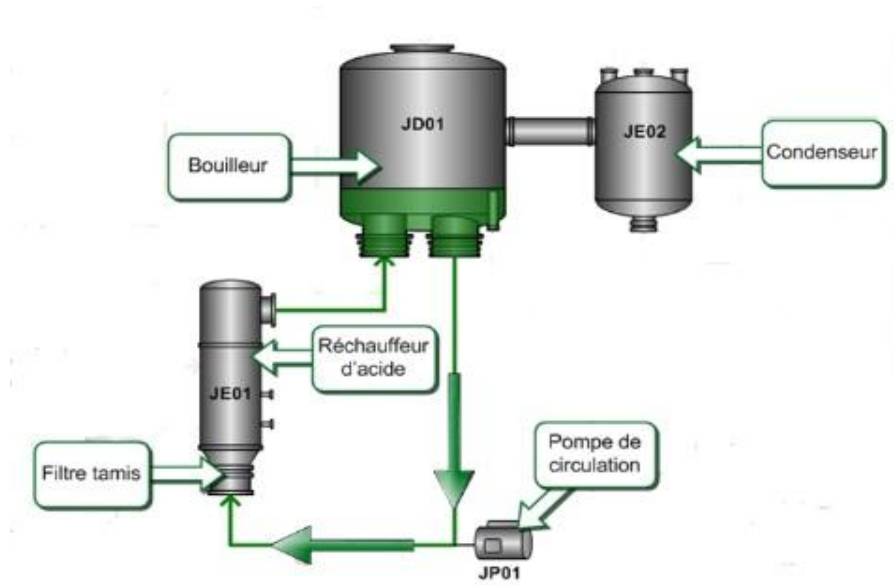


Figure 11 : Echelon de concentration [4]

6. Stockage d'acide concentré

L'acide phosphorique concentré à clarifier est d'abord refroidi pour provoquer la précipitation des impuretés, après un séjour dans le désursaturateur pour y faire grossir les cristaux, l'acide est acheminé au décanteur pour séparer les solides formés. L'acide refroidi et clarifié est alimenté aux bacs de stockage via la colonne liquide, et les boues chargées d'impuretés sont dirigées au bac à boues.

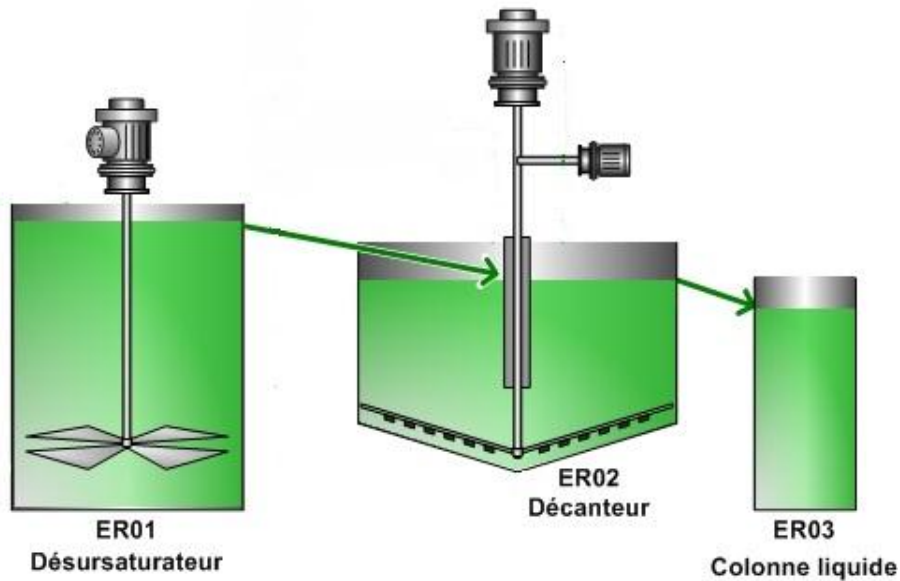


Figure 12 : Stocke d'acide concentré [4]

7. Assainissement des gaz

Le traitement des gaz issus des réactions de production d'acide phosphorique est un enjeu majeur pour l'unité d'où la nécessité de le contrôler afin d'atteindre l'efficacité souhaitée en termes de rejets de gaz et le respect de l'environnement.

Le procédé JACOBS utilise un « Fume Scrubber » (Figure 13) pour laver les gaz provenant de la cuve d'attaque et de la section de filtration.

Le « Fume Scrubber » utilisé se présente sous une forme parallélépipédique constitué de plusieurs lits filtrants organisés verticalement en quatre lignes parallèles. Chaque ligne compte quatre cartouches qui sont arrosées par des pulvérisateurs.

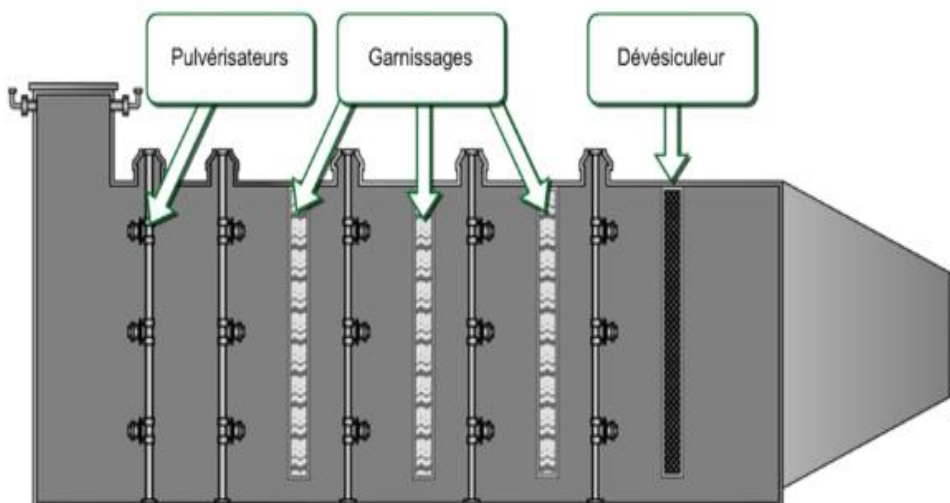


Figure 13 : Laveur des gaz SCRUBBER [4]

Chapitre 3 : Description détaillée du fonctionnement du SCRUBBER

I. Rôle de l'opération

Le laveur des gaz est utilisé pour épurer les buées provenant des cuves réactionnelles et des filtres en utilisant de l'eau, les principaux composés fluorés gazeux enlevés sont le fluorure d'hydrogène(HF) et le tétra-fluorure de silicium(SiF₄).

II. Caractéristiques du liquide de lavage

L'eau utilisée pour laver les gaz au sein du laveur des gaz SCRUBBER se compose de trois types d'eau, les trois premiers compartiments sont alimentés par l'eau recyclée du bassin R07, le quatrième est alimenté par l'eau recyclée du bassin R06, alors que le dernier compartiment est alimenté par l'eau brute.

Ce liquide de lavage a été choisi selon les caractéristiques suivantes :

- Une forte capacité d'absorption vis-à-vis des composés à éliminer,
- Une faible viscosité afin de faciliter sa mise en œuvre et de limiter la facture énergétique,
- Une pression de vapeur suffisamment basse afin d'éviter qu'il ne devienne lui-même un polluant,
- Pas de risque pour la santé et la sécurité,
- Inerte vis à vis des matériaux utilisés,
- Peu cher ou régénérable à faible coût.

III. Description de l'équipement

1. Principales composantes

Le laveur des fumées, de configuration horizontale, est constitué d'un ensemble de pulvérisateurs, de garnissages et de devésiculeurs placés à l'intérieur du corps du laveur. La circulation des gaz est assurée par un ventilateur avec une pression sous vide, ce ventilateur est raccordé à une cheminée.

2. Matériaux

L'enveloppe du laveur est fabriquée en acier au carbone avec un revêtement interne en caoutchouc. Les garnissages et les pulvérisateurs installés au cœur du laveur des gaz sont en polypropylène.

IV. Principe de l'opération

Cette opération permet de transférer les polluants de la phase gazeuse vers la phase liquide selon le principe de diffusion moléculaire. Ce principe repose sur l'équilibre physique qui existe lorsqu'on met en contact une phase gazeuse contenant un composé donné et une phase liquide dans laquelle ce composé est soluble.

Le processus de transfert est lié aux mécanismes de diffusion favorisés par la pulvérisation et le garnissage. Le choix du liquide de lavage conditionne la quantité de matière transférable de la phase gazeuse vers la phase liquide.

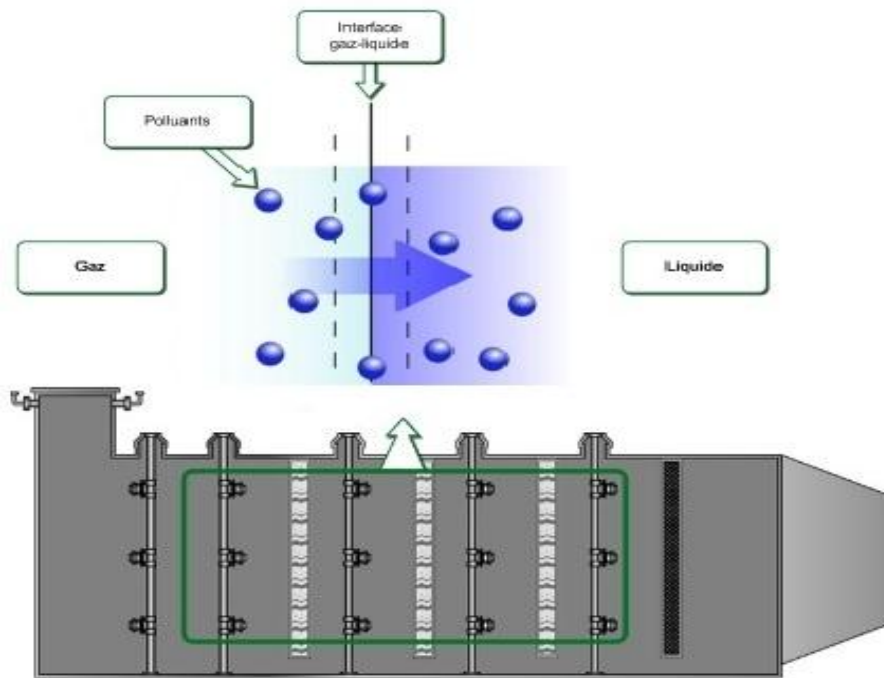


Figure 14 : Mécanisme de l'absorption au sein du laveur [4]

Le fluide de lavage utilisé est de l'eau recyclée, provenant des fosses d'eau, pour les cinq premières sections et de l'eau brute, provenant du stockage pour la dernière.

Le premier contact des buées avec le liquide de lavage se fait par les pulvérisateurs à l'entrée de la partie verticale du laveur. Des gouttelettes d'eau recyclée sont acheminées à co-courant afin d'initier l'absorption.

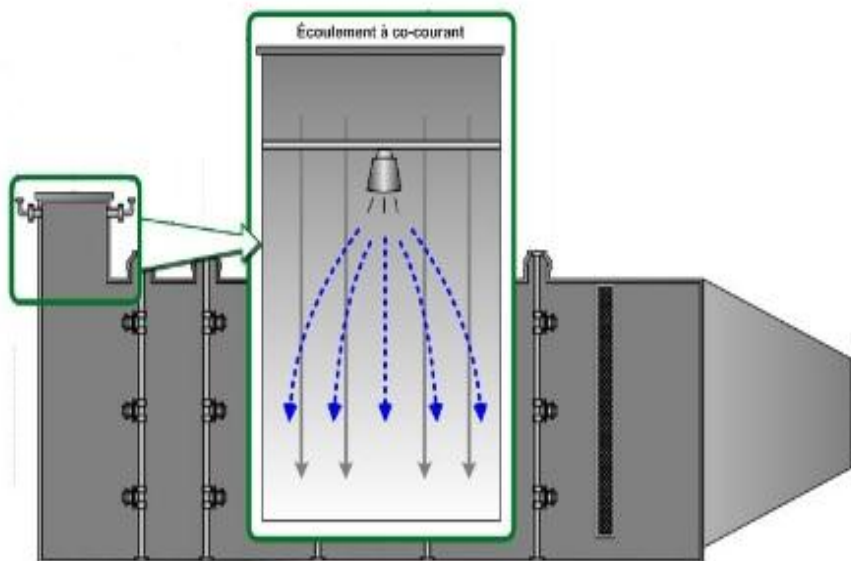


Figure 15 : Ecoulement à co-courant [4]

Ensuite, dans la partie horizontale du laveur. Une autre série de pulvérisateurs envoient de fines gouttelettes d'eau, cette fois à contre-courant. L'injection à contre-courant favorise l'échange de matière entre le gaz et le liquide, améliorant ainsi l'efficacité du procédé.

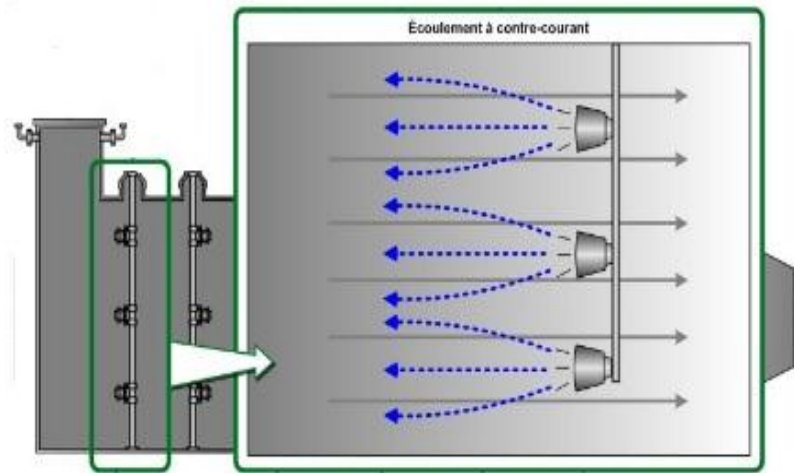


Figure 16 : Écoulement à contre-courant [4]

Le gaz traverse ensuite les étages de garnissage, où le contact gaz-liquide se fait à courant-croisé. Ces étages sont constitués de pulvérisateurs et de garnissage en série. Le rôle des garnissages est de retirer la phase liquide chargée en l'évacuant par gravité et d'augmenter la surface de contact gaz-liquide.

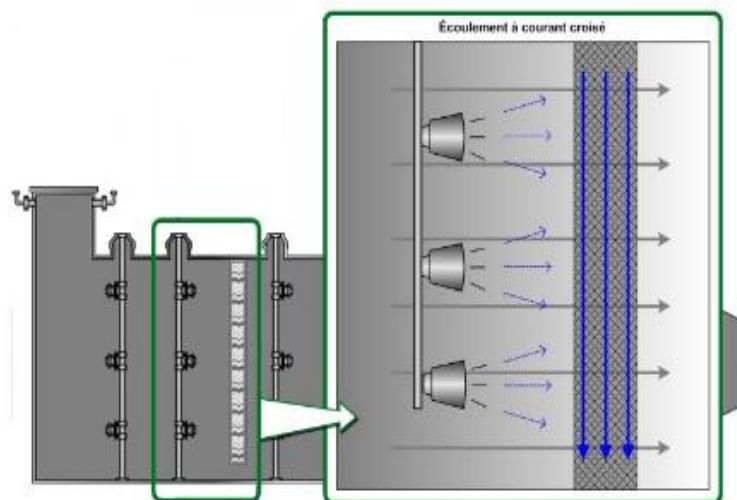


Figure 17 : Écoulement à contre-croisé [4]

On définit sous le nom de dévésiculation toute action ou procédé dans lequel un flux gazeux est débarrassé de ses gouttelettes via une séparation gaz/liquide par impaction. Les matelas dévésiculeurs sont situés à toute fin du laveur des gaz. La disposition de cet étage est la même que pour le garnissage, c'est-à-dire que des pulvérisateurs projettent de l'eau sur les dévésiculeurs des éléments fabriqués avec un fin grillage. Les gouttelettes contenues dans le

gaz traversent le grillage et heurtent sa surface. Elles se combinent pour former un film liquide s'évacuant par gravité à la base du laveur.

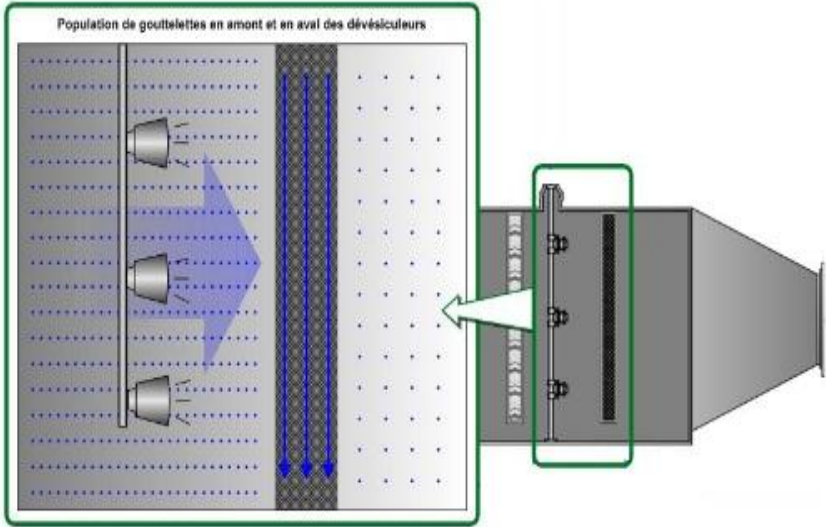


Figure 18 : Population de gouttelettes en amont et en aval des dévésiculeurs [4]

Chapitre 4 : Efficacité du laveur des gaz SCRUBBER

I. Bilan matière

L'objectif de ce bilan matière est de déterminer la quantité de Fluor et de P_2O_5 dans différentes phases à l'entrée et à la sortie, ainsi que les débits des différents effluents dans chaque point d'entrée et de sortie de l'installation. Le bilan de matière est fait avec les paramètres de fonctionnement nominal d'une unité de production d'acide phosphorique.

1. Introduction et mise en équation

Nous avons schématisé sur la figure (19) toutes les entrées et les sorties d'eau ainsi que l'entrée et la sortie de fumée, d'après cette figure nous avons constaté que les circuits sont assez compliqués, ce qui rend la détermination de quelques paramètres plus difficile, c'est pour cette raison nous avons proposé de faire quelques modifications sur ce schéma qui a pour but de faciliter la détermination des paramètres inconnus ainsi que la mise en équation.

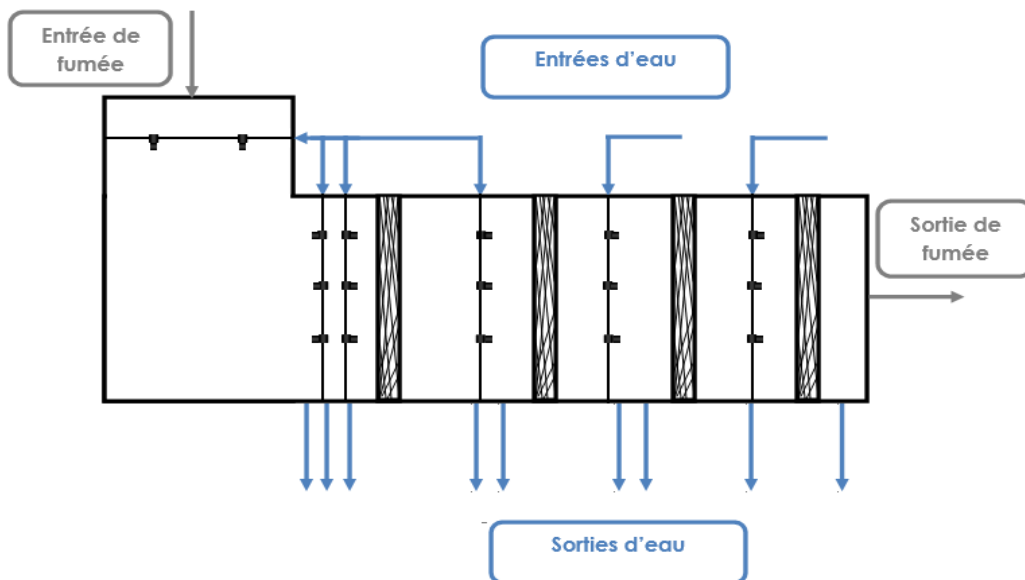


Figure 19 : Schéma des circuits d'eau et de fumée du laveur

De façon générale les équations du bilan matière s'expriment comme suit :

Bilan total

$$V_E + L_E = V_S + L_S$$

Bilan partiel

$$V_E \cdot Y_E + L_E \cdot X_E = V_S \cdot Y_S + L_S \cdot X_S$$

Avec :

V_E, V_S : Respectivement le débit du gaz à l'entrée et à la sortie

L_E, L_S : Respectivement le débit d'eau à l'entrée et à la sortie

Y_E, Y_S : Respectivement le titre du constituant dans le gaz à l'entrée et à la sortie

X_E, X_S : Respectivement le titre du constituant dans l'eau à l'entrée et à la sortie

Le laveur des gaz est divisé en cinq compartiments, nous appliquons les équations générales du bilan total et partiel sur ces compartiments, puis nous simplifions pour que nous obtenons finalement trois compartiments représentés par leurs équations, et ces équations que nous allons utiliser par la suite pour établir les équations finales du bilan matière.

- *Premier et deuxième compartiment*

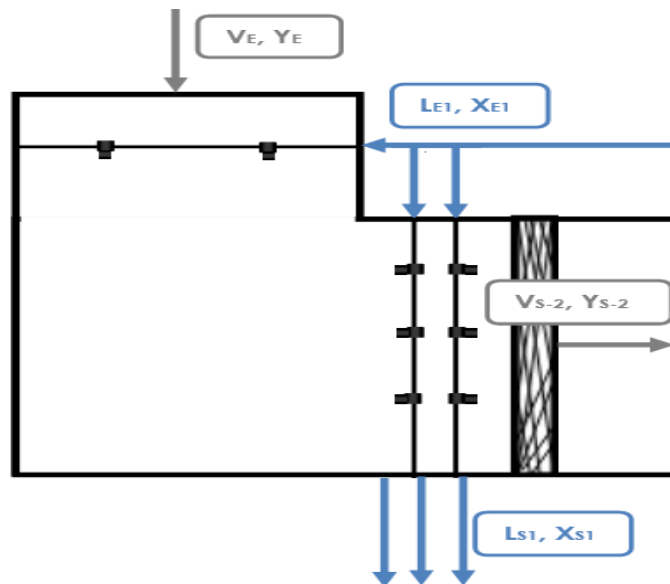


Figure 20 : Schéma du 1er et 2ème compartiment du laveur

Pour le 1^{er} et le 2^{ème} compartiment, nous voyons que ne sont pas séparés par des garnissages et l'eau de sortie s'écoule dans le même bassin (Annexe 3), donc on peut considérer que ces deux compartiments ont qu'une seule entrée et qu'une seule sortie, et sur lesquels nous pouvons considérer comme un seul compartiment.

- *Troisième compartiment*

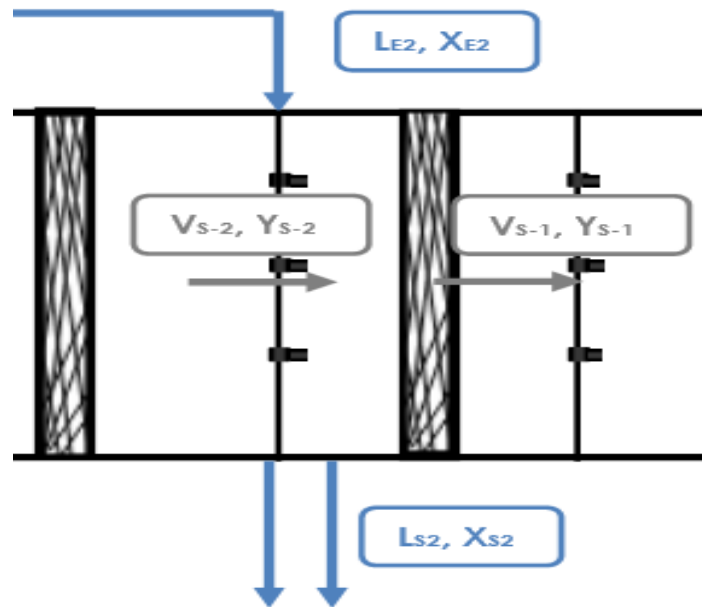


Figure 21 : Schéma du 3ème compartiment du laveur

Pour le troisième compartiment, il ne semble pas assez compliqué, il comporte qu'une seule entrée et qu'une seule sortie.

- *Quatrième et cinquième compartiment*

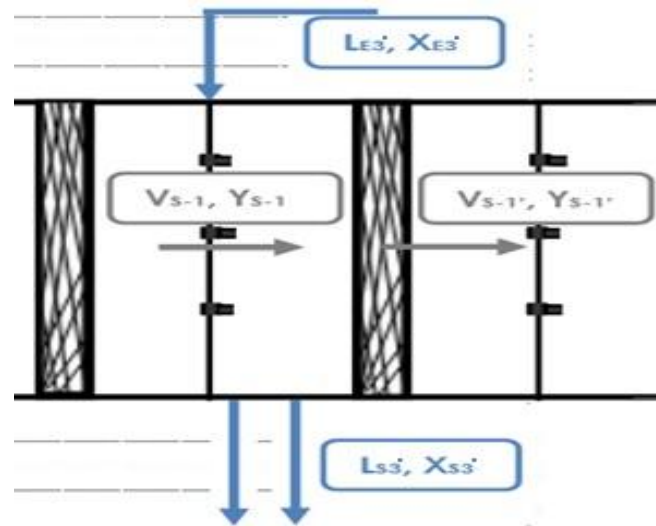


Figure 22 : Schéma du 4ème compartiment du laveur

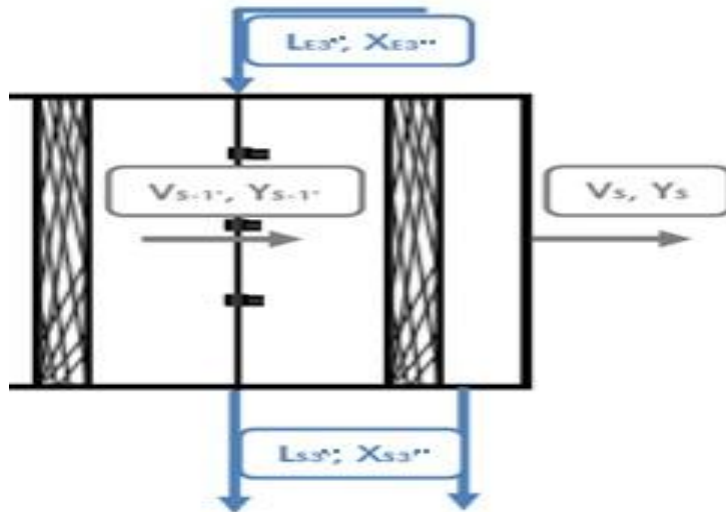


Figure 23 : Schéma du 5ème compartiment du laveur

Pour le 4ème et le 5ème compartiment, ils sont alimentés chacun par un circuit d'eau, l'eau qui alimente le dernier compartiment est une eau brute alors que celle qui alimente le troisième compartiment est une eau recyclée provenant du bassin R05 (Annexe 3), donc elles peuvent avoir deux titres différents à l'entrée.

$$L_{E3} = L_{E3'} + L_{E3''}$$

$$L_{E3}.X_{E3} = L_{E3'}.X_{E3'} + L_{E3''}.X_{E3''}$$

Avec :

$L_{E3'}$, $L_{E3''}$: respectivement le débit d'eau à l'entrée du 4ème et du 5ème compartiment avant la modification.

L_{E3} : débit d'eau à l'entrée du 3ème compartiment après la modification.

$X_{E3'}$, $X_{E3''}$: respectivement le titre du constituant dans l'eau à l'entrée du 4ème et du 5ème compartiment après la modification.

X_{E3} : titre du constituant dans l'eau à l'entrée du 3ème compartiment après la modification.

Tant que l'eau qui s'écoule par plusieurs débouchés dans le même bassin, on peut considérer que cette eau qui s'écoule, sorte d'un seul débouché.

$$L_{S3} = L_{S3'} + L_{S3''}$$

Avec :

$L_{S3'}$, $L_{S3''}$: respectivement le débit d'eau à la sortie du 4ème et du 5ème compartiment avant la modification.

L_{S3} : débit d'eau à la sortie du 3ème compartiment après la modification.

Donc au lieu de travailler sur cinq compartiments, nous les avons restreint en trois compartiments.

Premier compartiment :

Bilan total

$$V_E + L_{E1} = V_{S-2} + L_{S1}$$

Bilan partiel

$$V_E \cdot Y_E + L_{E1} \cdot X_{E1} = V_{S-2} \cdot Y_{S-2} + L_{S1} \cdot X_{S1}$$

Deuxième compartiment :

Bilan total

$$V_{S-2} + L_{E2} = V_{S-1} + L_{S2}$$

Bilan partiel

$$V_{S-2} \cdot Y_{S-2} + L_{E2} \cdot X_{E2} = V_{S-1} \cdot Y_{S-1} + L_{S2} \cdot X_{S2}$$

Troisième compartiment :

Bilan total

$$V_{S-1} + L_{E3} = V_S + L_{S3}$$

Bilan partiel

$$V_{S-1} \cdot Y_{S-1} + L_{E3} \cdot X_{E3} = V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3}$$

On remplace dans les équations, on obtient :

Bilan total

$$V_E + L_{E3} + L_{E2} + L_{E1} = V_S + L_{S3} + L_{S2} + L_{S1}$$

Bilan partiel

$$V_E \cdot Y_E + L_{E3} \cdot X_{E3} + L_{E2} \cdot X_{E2} + L_{E1} \cdot X_{E1} = V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3} + L_{S2} \cdot X_{S2} + L_{S1} \cdot X_{S1}$$

Avec :

L_{E1}, L_{E2}, L_{E3} : Respectivement le débit d'eau à l'entrée du 1^{er}, 2^{ème} et du troisième compartiment après la modification.

L_{S1}, L_{S2}, L_{S3} : Respectivement le débit d'eau à la sortie du 1^{er}, 2^{ème} et du troisième compartiment après la modification.

V_E, V_S : Respectivement le débit du gaz à l'entrée et à la sortie du laveur.

X_{E1}, X_{E2}, X_{E3} : Respectivement le titre du constituant dans l'eau à l'entrée du 1^{er}, 2^{ème} et du troisième compartiment après la modification.

X_{S1}, X_{S2}, X_{S3} : Respectivement le titre du constituant dans l'eau à la sortie du 1^{er}, 2^{ème} et du troisième compartiment après la modification.

Y_E, Y_S : Respectivement le titre du constituant dans la fumée à l'entrée et à la sortie du laveur.

2. Détermination des paramètres inconnus

Le laveur de gaz est pénétré par deux phases, chaque phase a des paramètres d'entrée et de sortie

2.1 Phase liquide

La phase liquide se représente par l'eau brute, l'eau recyclée à l'entrée, et l'eau chargée à la sortie.

2.1.1 Débits d'eau aux entrées

D'après les équations qu'on a démontré précédemment, les débits d'entrée se compose de :

L_{E1} : Débit d'eau à l'entrée du 1er compartiment

L_{E2} : Débit d'eau à l'entrée du 2eme compartiment

L_{E3} : Débit d'eau à l'entrée du 3eme compartiment

- Débits volumiques

Nous avons noté plusieurs valeurs des débits pendant la durée de notre stage, et nous avons pris la moyenne de ces valeurs.

Le tableau ci-dessous montre les débits d'alimentation moyennes :

Débits volumiques d'eau entrante m ³ /h				
L_{E1}	L_{E2}	$L_{E3'}$	$L_{E3''}$	L_{E3}
526,65	175,55	214,7	15,78	230,48

Tableau 1 : Débits volumiques d'eau à l'entrée du laveur

- De même pour la masse volumique, les valeurs sont prises au moment de la prise des débits d'eau

Masses volumiques d'eau entrante kg/m ³			
ρ_{E1}	ρ_{E2}	$\rho_{E3'}$	$\rho_{E3''}$
966	966	992	1000

Tableau 2 : Masses volumiques d'eau à l'entrée du laveur

- En termes de débit massique

Débits massiques d'eau entrante kg/h				
L_{E1}	L_{E2}	$L_{E3'}$	$L_{E3''}$	L_{E3}
508743,9	169581,3	212982,4	15780	228762,4

Tableau 3 : Débits massiques d'eau à l'entrée du Laveur

De façon générale, le débit massique se calcule comme suit :

$$q_m = \rho \times q_v$$

Avec :

q_m : Débit massique kg/h

q_v : Débit volumique m³/h

2.1.2 Débits d'eau aux sorties

Les débits de sortie se compose de :

L_{S1} : Débit d'eau à l'entrée du 1er compartiment

L_{S2} : Débit d'eau à l'entrée du 2eme compartiment

L_{S3} : Débit d'eau à l'entrée du 3eme compartiment

- Débits volumiques

Les débits d'eau à la sortie du laveur est égal approximativement à ceux d'eau à l'entrée :

Débits volumiques d'eau sortante m ³ /h		
L_{S1}	L_{S2}	L_{S3}
526,65	175,55	230,48

Tableau 4 : Débits volumiques d'eau à la sortie du laveur

- Masses volumiques

Masse volumiques d'eau sortante kg/m ³		
ρ_{S1}	ρ_{S2}	ρ_{S3}
927	945	973

Tableau 5 : Masse volumiques d'eau à la sortie du laveur

- En termes de débit massique

Débits massiques d'eau sortante kg/h		
L_{S1}	L_{S2}	L_{S3}
488204,55	165894,75	224257,04

Tableau 6 : Débits massiques d'eau à la sortie du laveur

2.1.3 Titres en Fluor aux entrées

Titres massiques en Fluor à l'entrée			
X_{E1}	X_{E2}	$X_{E3'}$	$X_{E3''}$
$0,4502 \cdot 10^{-4}$	$0,4502 \cdot 10^{-4}$	$0,6314 \cdot 10^{-4}$	0

Tableau 7 : Titres massiques en Fluor dans l'eau entrante

2.1.4 Titres en Fluor aux sorties

Titres massiques en Fluor à la sortie		
X_{S1}	X_{S2}	X_{S3}
$0,21962 \cdot 10^{-3}$	$0,1357 \cdot 10^{-3}$	$0,7866 \cdot 10^{-4}$

Tableau 8 : Titres massiques en Fluor dans l'eau sortante

2.1.5 Titres en P_2O_5 aux entrées

Titres massiques en P_2O_5 à l'entrée			
X_{E1}	X_{E2}	$X_{E3'}$	$X_{E3''}$
$0,212 \cdot 10^{-5}$	$0,212 \cdot 10^{-5}$	$0,112 \cdot 10^{-5}$	$0,71 \cdot 10^{-6}$

Tableau 9 : Titres massiques en P_2O_5 dans l'eau entrante

2.1.6 Titres en P_2O_5 aux sorties

Titres massiques en P_2O_5 à la sortie		
X_{S1}	X_{S2}	X_{S3}
$0,47 \cdot 10^{-5}$	$0,264 \cdot 10^{-5}$	$0,114 \cdot 10^{-5}$

Tableau 10 : Titres massiques en P_2O_5 dans l'eau sortante

2.2 Phase gazeuse

2.2.1 Titre en Fluor à la sortie

La valeur du titre en fluor est indiquée à l'aide d'un détecteur qui est installé sur la cheminé. Nous avons noté une valeur moyenne

$$Y_S = 0,3 \cdot 10^{-10}$$

2.2.2 Titre en Fluor à l'entrée

La relation de l'établissement du titre à l'entrée s'écrit comme suit :

$$Y_E = \sum (X_{Si} - X_{Ei}) + Y_S$$

A.N

$$Y_E = (0,21962 \cdot 10^{-3} - 0,4502 \cdot 10^{-4}) + (0,1357 \cdot 10^{-3} - 0,4502 \cdot 10^{-4}) + (0,7866 \cdot 10^{-4} - 0,6314 \cdot 10^{-4}) + 0,3 \cdot 10^{-10}$$

$$Y_E = 1,746 \cdot 10^{-4} + 9,068 \cdot 10^{-5} + 1,552 \cdot 10^{-5} + 0,3 \cdot 10^{-10}$$

$$Y_E = 2,8 \cdot 10^{-4}$$

2.2.3 Débit du gaz à la sortie

On a l'équation qu'on a démontré précédemment

$$V_E \cdot Y_E + L_{E3} \cdot X_{E3} + L_{E2} \cdot X_{E2} + L_{E1} \cdot X_{E1} = V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3} + L_{S2} \cdot X_{S2} + L_{S1} \cdot X_{S1}$$

$$V_E \cdot Y_E = V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3} + L_{S2} \cdot X_{S2} + L_{S1} \cdot X_{S1} - L_{E3} \cdot X_{E3} - L_{E2} \cdot X_{E2} - L_{E1} \cdot X_{E1}$$

$$2,8 \cdot 10^{-4} \times V_E = 0,3 \cdot 10^{-10} \times V_S + 224257,04 \times 0,7866 \cdot 10^{-4} + 165894,75 \times 0,1357 \cdot 10^{-3} +$$

$$488204,55 \times 0,21962 \cdot 10^{-3} - 228762,4 \times 0,6314 \cdot 10^{-4} - 169581,3 \times 0,4502 \cdot 10^{-4} -$$

$$508743,9 \times 0,4502 \cdot 10^{-4}$$

$$2,8 \cdot 10^{-4} \times V_E = 0,3 \cdot 10^{-10} \times V_S + 17,64 + 22,51 + 107,22 - 14,44 - 7,63 - 22,9$$

$$2,8 \cdot 10^{-4} \times V_E = 0,3 \cdot 10^{-10} \times V_S + 102,4$$

On a également l'équation du bilan total

$$V_E + L_{E3} + L_{E2} + L_{E1} = V_S + L_{S3} + L_{S2} + L_{S1}$$

$$V_S = V_E + L_{E3} + L_{E2} + L_{E1} - L_{S3} - L_{S2} - L_{S1}$$

A.N

$$V_E = V_S - 25731,26$$

On remplace

$$2,8 \cdot 10^{-4} \cdot (V_S - 25731,26) = 0,3 \cdot 10^{-10} \cdot V_S + 102,4$$

$$V_S = 340000 \text{ kg/h}$$

2.2.4 Débit du gaz à l'entrée

Le débit du gaz à l'entrée s'exprime comme suit :

$$V_E = 340000 - 25721,26$$

$$V_E = 314268,8 \text{ kg/h}$$

2.2.5 Titre en P2O5 à la sortie

Le titre en P2O5 à la sortie est nul

$$Y_S = 0$$

2.2.6 Titre en P2O5 à l'entrée

On utilise l'équation du bilan partiel pour déterminer le titre en P2O5 à l'entrée

$$V_E \cdot Y_E + L_{E3} \cdot X_{E3} + L_{E2} \cdot X_{E2} + L_{E1} \cdot X_{E1} = V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3} + L_{S2} \cdot X_{S2} + L_{S1} \cdot X_{S1}$$

$$Y_E = \frac{V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3} + L_{S2} \cdot X_{S2} + L_{S1} \cdot X_{S1} - L_{E3} \cdot X_{E3} - L_{E2} \cdot X_{E2} - L_{E1} \cdot X_{E1}}{V_E}$$

$$Y_E = 4,1378 \cdot 10^{-6}$$

Bilan partiel par rapport chaque compartiment

ENTREES

1^{er} compartiment
 Gaz : 88 kg/h
 Liquide : 22,9 kg/h
2^{ème} compartiment
 Gaz : 35,3 kg/h
 Liquide : 7,63 kg/h
3^{ème} compartiment
 Gaz : 5 kg/h
 Liquide : 13,45

Fluor

Laveur des gaz
SCRUBBER

SORTIE

1^{er} compartiment
 Gaz : 35,3 kg/h
 Liquide : 107,22
2^{ème} compartiment
 Gaz : 5 kg/h
 Liquide : 22,51
3^{ème} compartiment
 Gaz : $1,02 \cdot 10^{-5}$ kg/h
 Liquide : 17,64 kg/h

Figure 24 : Schéma du bilan Fluor par rapport chaque compartiment

ENTREES

1^{er} compartiment
 Gaz : 1,3 kg/h
 Liquide : 1,08 kg/h
2^{ème} compartiment
 Gaz : 0,52 kg/h
 Liquide : 0,34
3^{ème} compartiment
 Gaz : 0,35 kg/h
 Liquide : 0,25 kg/h

P₂O₅

Laveur des gaz
SCRUBBER

SORTIE

1^{er} compartiment
 Gaz : 0,52 kg/h
 Liquide : 2,29 kg/h
2^{ème} compartiment
 Gaz : 0,35 kg/h
 Liquide : 0,44 kg/h
3^{ème} compartiment
 Gaz : 0 kg/h
 Liquide : 0,26 kg/h

Figure 25 : Schéma du bilan P2O5 par rapport chaque compartiment

Bilan partiel par rapport la totalité de l'équipement



Figure 26 : Schéma du bilan Fluor et P2O5 par rapport la totalité de l'équipement

II. Rendement chimique de l'équipement

Le rendement chimique de l'équipement s'exprime par :

$$r = \frac{\text{Quantité du gaz passée dans l'eau par unité de temps}}{\text{Quantité du gaz à l'entrée par unité de temps}}$$

- Dans le cas du Fluor

$$r = \frac{VE.YE - VS.YS}{VE.YE}$$

$$r = 0,99 \quad 99\%$$

- Dans le cas du P2O5

$$r = \frac{VE.YE - VS.YS}{VE.YE}$$

$$r = 1 \quad 100\%$$

III. Bilan énergie

L'établissement de ce bilan a pour but de déterminer les températures des différentes phases à l'entrée et à la sortie de l'installation, ainsi que la chaleur reçue par la phase liquide. Le bilan de matière est fait avec les paramètres de fonctionnement nominal d'une unité de production d'acide phosphorique.

1. Introduction et mise en équation

L'équation générale du bilan énergie s'écrit de la façon suivante :

$$Q_{\text{perdue}} = Q_{\text{reçue}}$$

Quantité de chaleur perdue par la fumée = Quantité de chaleur reçue par l'eau

Du même principe que la partie du bilan matière, nous allons démontrer les équations du bilan énergie.

1^{er} Compartiment

$$V_E \cdot C_{pE} \cdot (T_E - T_{S-2}) = L_{E1} \cdot C_{pE1} \cdot (T_{S1} - T_{E1})$$

$$V_E \cdot C_{pE} \cdot \Delta T_{1(g)} = L_{E1} \cdot C_{pE1} \cdot \Delta T_{1(l)}$$

2^{ème} Compartiment

$$V_{S-2} \cdot C_{pS-2} \cdot (T_{S-2} - T_{S-1}) = L_{E2} \cdot C_{pE2} \cdot (T_{S2} - T_{E2})$$

$$V_{S-2} \cdot C_{pS-2} \cdot \Delta T_{2(g)} = L_{E2} \cdot C_{pE2} \cdot \Delta T_{2(l)}$$

3^{ème} Compartiment

$$V_{S-1} \cdot C_{pS-1} \cdot (T_{S-1} - T_S) = L_{E3} \cdot C_{pE3} \cdot (T_{S3} - T_{E3})$$

$$V_{S-1} \cdot C_{pS-1} \cdot \Delta T_{3(g)} = L_{E3} \cdot C_{pE3} \cdot \Delta T_{3(l)}$$

On remplace dans les équations, on obtient l'expression suivante :

$$T_E = T_S + \frac{L_{E1} \cdot C_{pE1}}{V_E \cdot C_{pE}} \cdot \Delta T_{1(l)} + \frac{L_{E2} \cdot C_{pE2}}{V_{S-2} \cdot C_{pS-2}} \cdot \Delta T_{2(l)} + \frac{L_{E3} \cdot C_{pE3}}{V_{S-1} \cdot C_{pS-1}} \cdot \Delta T_{3(l)}$$

2. Détermination des paramètres inconnus

2.1 Phase liquide

2.1.1 Température de l'eau à l'entrée

Température de l'eau entrante C°			
T_{E1}	T_{E2}	T_{E3}	T_{E3}
41,2	41,2	30,6	23

Tableau 11 : Températures d'eau à l'entrée du laveur

2.1.2 Température de l'eau à la sortie

Température de l'eau sortante C°		
T_{S1}	T_{S2}	T_{S3}
45	42	33,8

Tableau 12 : Températures d'eau à la sortie du laveur

2.1.3 Capacité thermique massique

D'après les valeurs que nous avons trouvées dans la partie du bilan matière, la capacité thermique massique se calcule comme suit :

$$C_p = C_{pi} \cdot X_i(Y_i)$$

2.1.4 Capacité thermique massique de l'eau J/kg.C°		
C _{pE1}	C _{pE2}	C _{pE3}
4,226	4,226	4,223

Tableau 13 : Capacité thermique massique de l'eau

2.2 Phase gazeuse

2.2.1 Température du gaz à la sortie

Cette température est déterminée par un thermomètre qui est installé sur la cheminée

$$T_s = 41 \text{ C}^\circ$$

2.2.2 Capacité thermique massique

Capacité thermique massique du gaz J/kg.C°		
C _{pE}	C _{pS-2}	C _{pS-1}
1,458	1,458	1,452

Tableau 14 : Capacité thermique massique du gaz

2.2.3 Température du gaz à l'entrée

La température du gaz à l'entrée du laveur se calcule comme suit :

$$T_E = T_s + \frac{LE1 \cdot C_{pE1}}{VE \cdot C_{pE}} \cdot \Delta T_{1(l)} + \frac{LE2 \cdot C_{pE2}}{VS-2 \cdot C_{pS-2}} \cdot \Delta T_{2(l)} + \frac{LE3 \cdot C_{pE3}}{VS-1 \cdot C_{pS-1}} \cdot \Delta T_{3(l)}$$

A.N

$$T_E = 41 + \frac{508743,9 \times 4,226}{314268,8 \times 1,458} \times 3,8 + \frac{169581,3 \times 4,226}{334808,15 \times 1,458} \times 0,8 + \frac{228762,4 \times 4,223}{338494,7 \times 1,452} \times 3,2$$

$$T_E = 66,2576 \text{ c}^\circ$$

IV. Rendement thermique de l'équipement

Le rendement thermique de l'équipement s'exprime par :

$$\eta = \frac{\text{Quantité de chaleur récupérée par l'eau}}{\text{Quantité de chaleur produite}}$$

Ce qui donne en utilisant les résultats précédemment calculés :

$$\eta = 11,8\%$$

Chapitre 5 : Etude des pertes de charge au niveau du SCRUBBER

I. Description de l'étude

Nous allons étudier l'effet de chaque paramètre sur les pertes de charge au niveau du laveur des gaz, les paramètres qui sont concernés sont :

- Vitesse du ventilateur
- Débit d'eau recyclée P07
- Débit d'eau recyclée P09
- Débit d'eau brute

Dans ce contexte, nous avons décidé d'effectuer un plan d'expérience pour identifier d'une part les paramètres qui ont des effets négatifs, positifs, ou neutres, et d'autre part ceux d'entre eux qui ont un effet majeur. Nous avons utilisé le logiciel Nemrodw pour réaliser ce travail.

II. Construction du plan d'expérience

C'est une étude qui s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la *réponse*, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot *facteur*. La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs. La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

Les choix des niveaux étant techniques, l'avis des techniciens est indispensable.

III. Stratégie d'étude

- Nombre de facteur $K = 4$
- Dans notre cas, nous allons travailler à 2 niveaux
- Donc le nombre d'expérience est égale à 8

Facteurs :

Les facteurs sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Facteurs		Niveau -	Niveau +
X1	Vitesse du ventilateur	700 tr/min	950 tr/min
X2	Débit d'eau chargée P07	460 m3/h	900 m3/h
X3	Débit d'eau chargée P09	120 m3/h	400 m3/h
X4	Débit d'eau brute EV313	15 m3/h	20 m3/h

Tableau 15 : Facteurs et niveaux

Réponse :

La réponse Y étudiée, perte de charge, est donnée par le tableau suivant :

N° Exp	1	2	3	4	5	6	7	8
Perte de charge	0,02	0,12	0,12	0,14	0,11	0,02	0,02	0,10

Tableau 16 : réponses des pertes de charge

IV. Analyse des résultats

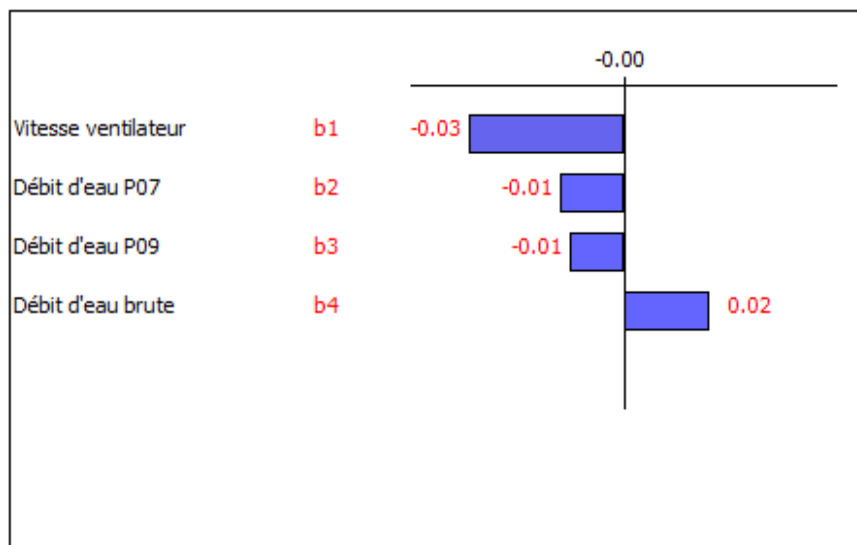


Figure 27 : Etude graphique des effets

La figure ci-dessus montre l'effet de chaque facteur quel que soit positif, négatif ou neutre sur la perte de charge.

Dans le cas de vitesse du ventilateur, lorsqu'on passe d'un niveau inférieur qui est de 700 tr/min à un niveau supérieure qui est de 950 tr/min, les pertes de charge diminuent, car la vitesse du ventilateur influence négativement sur ces pertes de charge.

La même chose pour le débit d'eau P07 et P09, les pertes de charge diminuent lorsqu'on passe de 460 m³/h à 900 m³/h pour le débit d'eau P07 et 120 m³/h à 400 m³/h pour le débit d'eau P09.

Contrairement à l'effet des trois facteurs précédents, l'effet du débit d'eau brute sur l'évolution des pertes de charge est positif, ça veut dire que les pertes de charge augmentent lorsqu'on passe d'un niveau de 15 m³/h à un niveau de 20 m³/h.

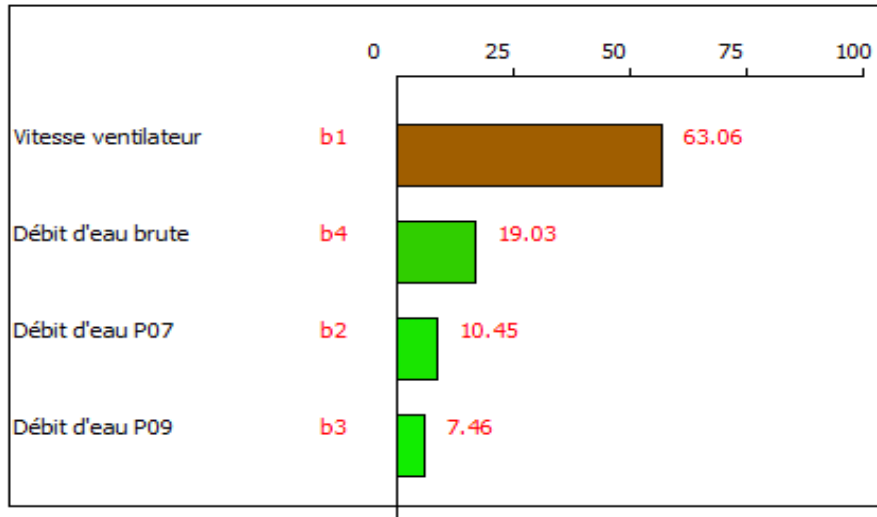


Figure 28 : Effets de Pareto individuels

D'après la représentation des effets de Pareto individuels, nous avons constaté que la vitesse du ventilateur a un effet majeur sur les pertes de charge.

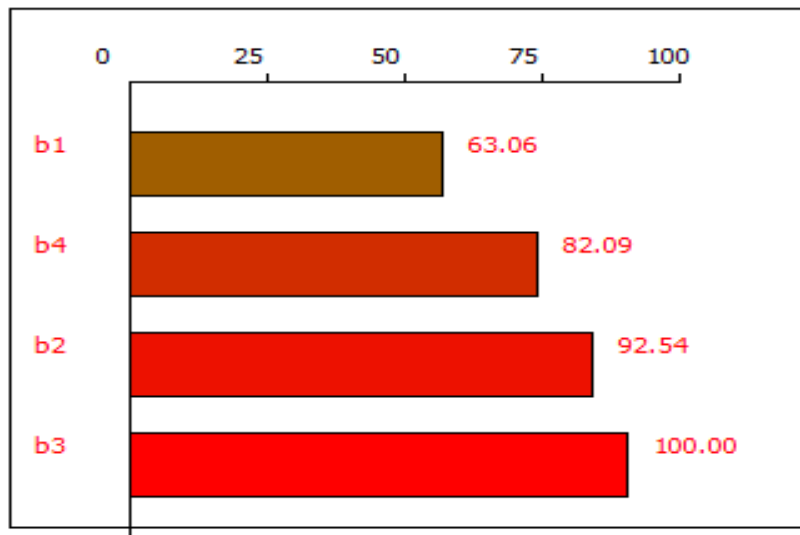


Figure 29 : Effets Pareto cumulés

Et selon la représentation des effets Pareto cumulés, les facteurs qui ont un effet significatif sur les pertes de charge sont :

- Vitesse du ventilateur
- Débit d'eau brute

Les autres facteurs n'ont presque aucun effet sur les pertes de charge.

Chapitre 6 : Optimisation des configurations du laveur des gaz SCRUBBER

I. Description de l'étude

L'objectif de cette étude est d'identifier l'effet de chaque paramètre de marche du laveur et de trouver la valeur optimale de chacun de ces paramètres pour qu'on sort finalement avec des résultats optimaux de cet équipement.

Donc nous allons étudier l'effet des paramètres suivants sur le rendement thermique, et la concentration en fluor dans le gaz à la sortie du laveur :

- Vitesse du ventilateur
- Débit d'eau recyclée P07
- Débit d'eau recyclée P09
- Débit d'eau brute
- Ouverture de la vanne LY309
- Ouverture de la vanne LY291
- Ouverture de la vanne LY351

Nous allons utiliser le logiciel Nemrodw pour réaliser ce travail.

II. Stratégie d'étude

- Nombre de facteur $K = 7$
- Dans notre cas, nous allons travailler à 2 niveaux
- Donc le nombre d'expérience est égale à 8

Facteurs :

Le tableau ci-dessous représente les facteurs et les niveaux sur lesquels nous allons réaliser ce plan d'expérience :

Facteurs		Niveau -	Niveau +
X1	Vitesse du ventilateur	700 tr/min	950 tr/min
X2	Débit d'eau chargée P07	460 m3/h	900 m3/h
X3	Débit d'eau chargée P09	120 m3/h	400 m3/h
X4	Débit d'eau brute EV313	15 m3/h	20 m3/h
X5	Ouverture de la vanne LY309	50%	60%
X6	Ouverture de la vanne LY291	0%	60%
X7	Ouverture de la vanne LY351	0%	60%

Tableau 17 : Facteurs et niveaux

Réponse :

Les réponses Y étudiées, Rendement thermique, la concentration en Fluor dans le gaz à la sortie, sont données par le tableau suivant :

N° Exp	1	2	3	4	5	6	7	8
Rendement thermique %	11,8	17,6	13,93	7,3	16	8,76	13,15	5,48
Concentration en Fluor dans le gaz à la sortie mg/Nm ³	3,15	0,85	1,4	4	0,47	1,81	2,92	6,3

Tableau 18 : Résultats des essais

III. Analyse des résultats

1. Rendement thermique

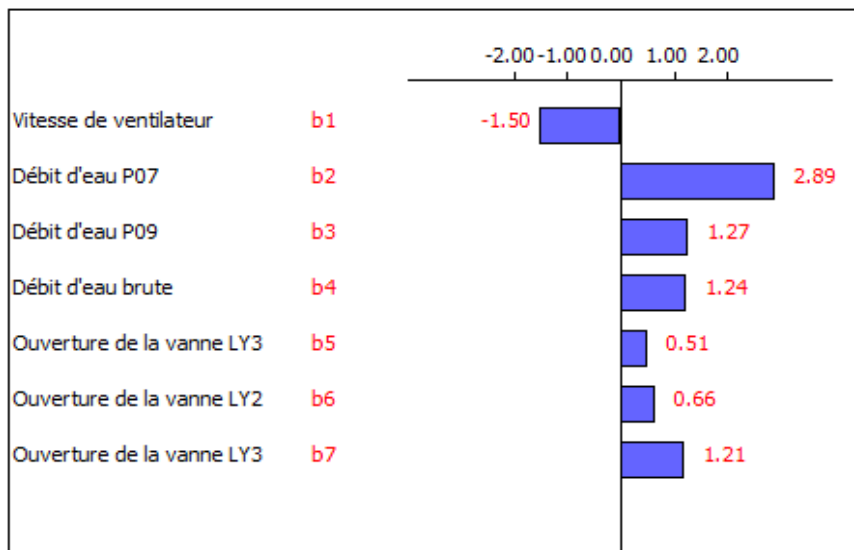


Figure 30 : Etude graphique des effets

La figure ci-dessus montre l'effet de chaque facteur quel que soit positif, négatif ou neutre sur le rendement thermique.

Sauf la vitesse du ventilateur, tous les facteurs ont un effet positif sur le rendement thermique, ça veut dire que le rendement thermique augmente lorsque ces facteurs passent d'un niveau inférieur à un niveau supérieure.

Le rendement thermique diminue avec l'augmentation de la vitesse du ventilateur.

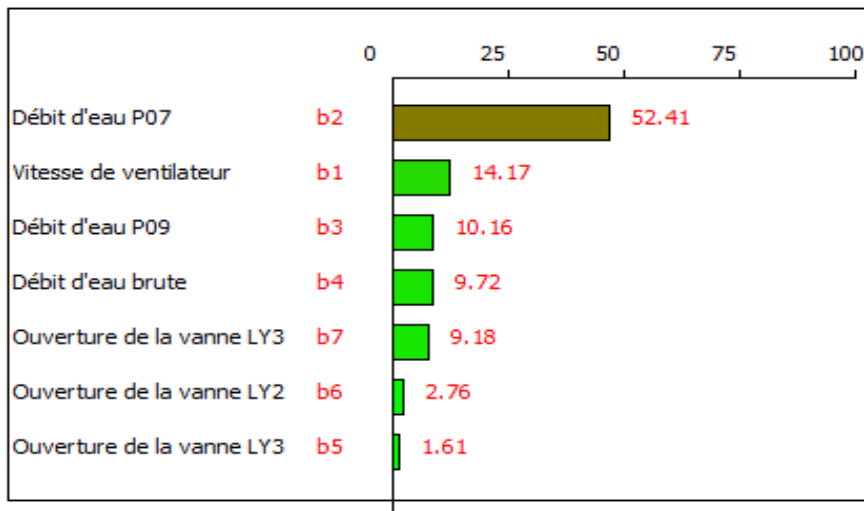


Figure 31 : Effets de Pareto individuels

D'après la représentation des effets de Pareto individuels, nous avons constaté que le débit d'eau P07 a un effet majeur sur le rendement chimique.

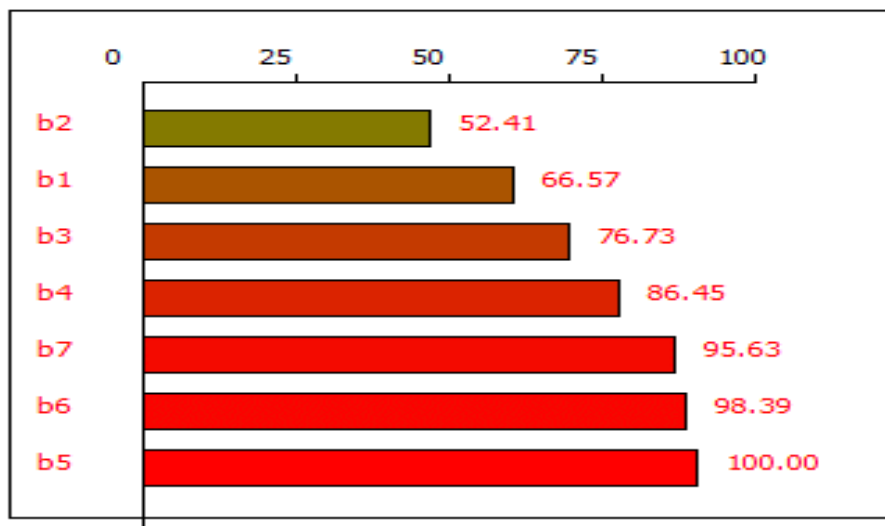


Figure 32 : Effets Pareto cumulés

Et selon la représentation des effets Pareto cumulés, les facteurs qui ont un effet significatif sur les pertes de charge sont :

- Débit d'eau P07
- Vitesse du ventilateur
- Débit d'eau P09
- Débit d'eau brute

Les autres facteurs n'ont presque aucun effet sur le rendement thermique.

2. Concentration en fluor

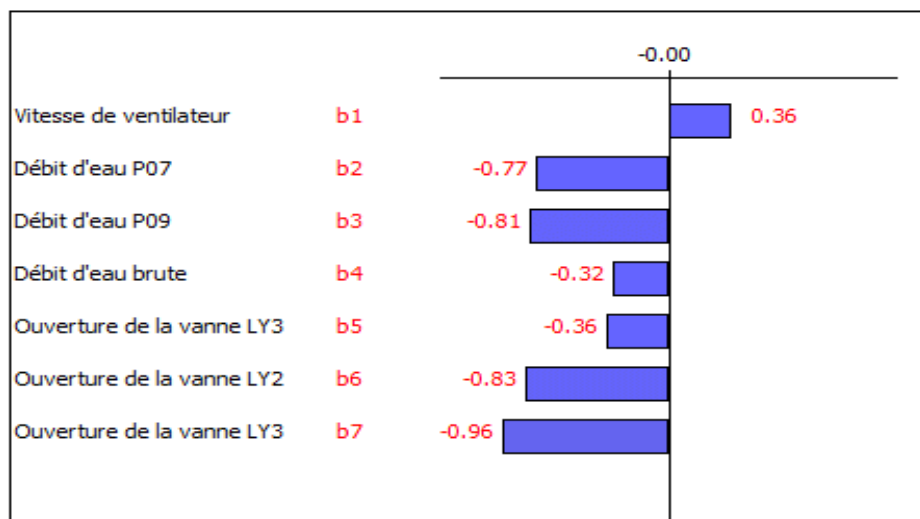


Figure 33 : Etude graphique des effets

La figure ci-dessus montre l'effet de chaque facteur quel que soit positif, négatif ou neutre sur le rendement thermique.

Sauf la vitesse du ventilateur, tous les facteurs ont un effet positif sur concentration en fluor dans le gaz à la sortie, ça veut dire que cette concentration augmente lorsque ces facteurs passent d'un niveau inférieur à un niveau.

La concentration en fluor dans le gaz à la sortie diminue avec l'augmentation de la vitesse du ventilateur.

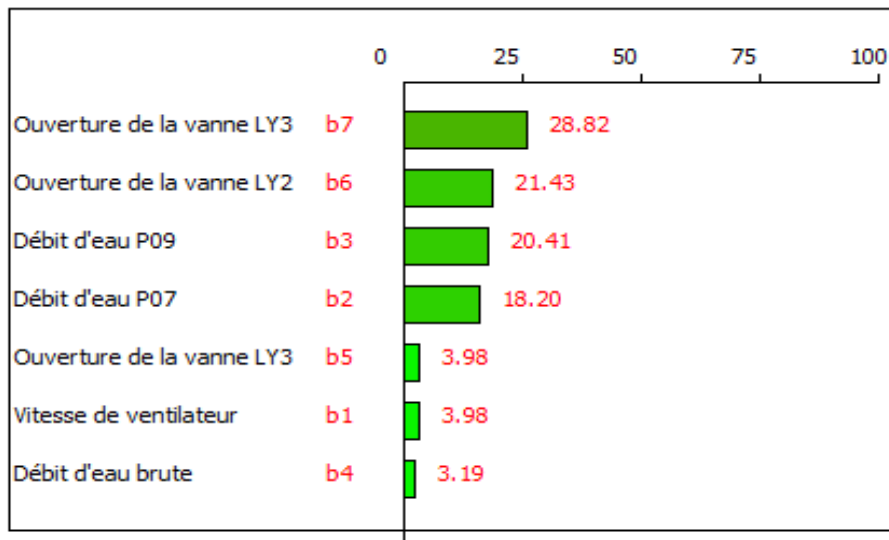


Figure 34 : Effets de Pareto individuels

Suivant la représentation des effets de Pareto individuels, nous avons constaté que le pourcentage d'ouverture de la vanne LY351A a un effet majeur sur la concentration en fluor dans le gaz à la sortie.

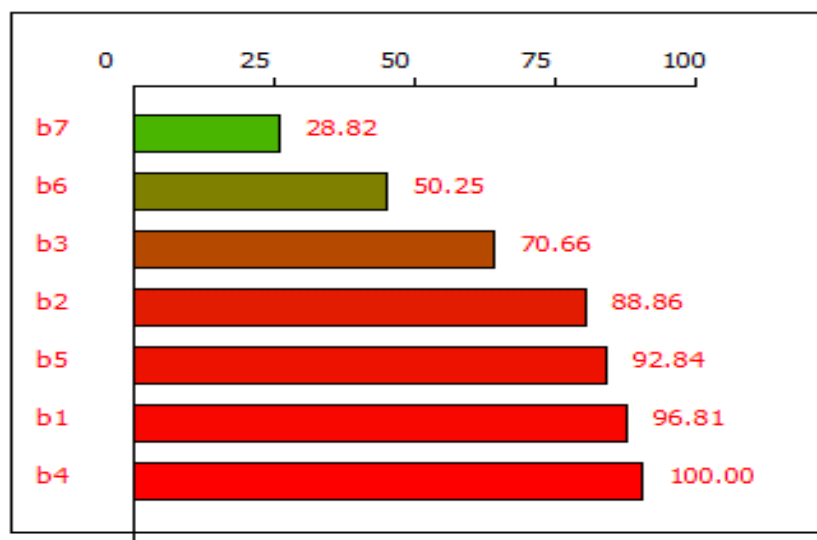


Figure 35 : Effets Pareto cumulés

Et selon la représentation des effets Pareto cumulés, les facteurs qui ont un effet significatif sur la concentration en fluor sont :

- Ouverture de la vanne LY3
- Ouverture de la vanne LY2
- Débit d'eau P09
- Débit d'eau P07

Les autres facteurs n'ont presque aucun effet sur la concentration en fluor.

IV. Conclusion

selon les résultats précédents , nous avons constaté que la vitesse du ventilateur influence négativement sur le rendement thermique et positivement sur la concentration en fluor à la sortie du laveur ,ça veut dire que lorsque nous passons d'une vitesse de 700 tr/min à une vitesse de 950 tr/min , le rendement thermique diminue et la concentration en fluor augmente ,tant que nous cherchons d'augmenter le rendement chimique et de diminuer la concentration en fluor à la sortie du laveur , c'est mieux pour nous de travailler avec une vitesse du ventilateur de 700 tr/min au lieu de travailler avec une vitesse supérieure ,car c'est un manque d'efficacité et une perte d'énergie et par conséquent une perte d'argent.

Conclusion générale

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'amélioration continue des installations de production en général et de celles de la dépollution des gaz en particulier. L'intérêt porté à ces systèmes vient de la dualité de leur importance qui touche à la fois la préservation de l'environnement et les rendements du process de production.

Les différentes technologies de lavage des gaz ont un même objectif : permettre un contact intime entre le gaz et le liquide de lavage. Ce contact permet le passage des éléments nuisibles ou d'intérêt de la phase gazeuse à la phase liquide.

Au terme de nos investigations, il est pour nous question maintenant de faire le point sur les résultats du travail par rapport aux objectifs fixés puis d'en apporter éventuellement des améliorations et perspectives.

Premièrement nous avons entamé notre projet par l'élaboration des bilans de matière et énergétique, afin de mieux connaître le système de lavage d'une part, et pour évaluer les performances du laveur d'autre part, et aussi pour utiliser les résultats obtenus dans la suite de notre étude.

Un plan d'expérience est utilisé pour identifier et évaluer les causes principales de l'augmentation des pertes de charge.

Dans les perspectives de l'amélioration de performance du laveur, nous avons fait une étude d'optimisation des configurations de cet équipement dans laquelle nous avons effectué un plan expérience.

Références Bibliographiques

Document : Support de formation PAP, groupe OCP Jorf Lasfar. [1]

Document : Rapport de stage LAKRAD Sofia, 2016, groupe Office Chérifien des Phosphates. [2]

Document : archive du service documentation du groupe OCP Jorf Lasfar. [3]

Document : Support de formation JFC, service acide phosphorique [

Annexes

Annexe 1 : Mode opératoire

Dosage des ions fluorures méthode potentiométrique

On se propose de déterminer la concentration en ions fluorure dans divers échantillons liquides, par la méthode avec étalonnage, en utilisant une électrode spécifique.

Mode opératoire :

Préparation de solution

On introduit dans un bêcher en plastique 10 ml d'échantillon, on verse 25 ml de solution tampon (CDTA), puis on complète jusqu'à un volume de 50 ml avec de l'eau distillée.

Utilisation de l'électrode

Avant l'utilisation de l'électrode, on le rince avec de l'eau distillée, et on essuie avec du papier Joseph, ensuite on plonge l'électrode dans la solution qu'on a préparé et on maintient une agitation suffisante pour assurer une bonne homogénéisation.

Détermination de la concentration de P_2O_5 par colorimétrie

Mode opératoire :

Préparation des solutions

Solution du blanc :

On introduit l'eau distillée dans une fiole jaugée de 100 ml.

Echantillon :

On introduit 2 ml de notre échantillon dans une fiole jaugée de 100 ml, on ajoute 1 ml de la solution d'acide ascorbique et 2 ml de la solution de réactif combiné à l'aide d'une pipette, on agite après l'introduction de chaque réactif, puis on complète au volume avec de l'eau distillée et on homogénéise le mélange.

Matériau de référence :

Dans une fiole de 100 ml on introduit 1 ml de la solution d'acide ascorbique et 2 ml de la solution de réactif combiné, on agite après l'introduction de chaque réactif, puis on complète au volume avec de l'eau distillée et on homogénéise le mélange.

On laisse les solutions se repose pendant 30 minutes pour le développement de la concentration.

Utilisation de l'appareil

On met la cuve de l'échantillon dans le spectrophotomètre, l'appareil nous affiche directement la concentration du P_2O_5 dans cet échantillon.

Annexe 2 : Démonstration des équations des bilans

Bilan matière

Bilan total :

1^{er} Compartiment

$$V_E + L_{E1} = V_{S-2} + L_{S1}$$

2^{ème} Compartiment

$$V_{S-2} + L_{E2} = V_{S-1} + L_{S2}$$

3^{ème} Compartiment

$$V_{S-1} + L_{E3} = V_S + L_{S3}$$

$$V_{S-1} = V_S + L_{S3} - L_{E3}$$

On remplace dans l'équation du 2^{ème} compartiment, on obtient :

$$V_{S-2} = V_S + L_{S3} + L_{S2} - L_{E3} - L_{E2}$$

Après le remplacement dans l'équation du 1^{er} compartiment, on obtient l'équation finale :

$$V_E + L_{E3} + L_{E2} + L_{E1} = V_S + L_{S3} + L_{S2} + L_{S1}$$

Bilan partiel :

1^{er} Compartiment

$$V_E \cdot Y_E + L_{E1} \cdot X_{E1} = V_{S-2} \cdot Y_{S-2} + L_{S1} \cdot X_{S1}$$

2^{ème} Compartiment

$$V_{S-2} \cdot Y_{S-2} + L_{E2} \cdot X_{E2} = V_{S-1} \cdot Y_{S-1} + L_{S2} \cdot X_{S2}$$

3^{ème} Compartiment

$$V_{S-1} \cdot Y_{S-1} + L_{E3} \cdot X_{E3} = V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3}$$

$$V_{S-1} \cdot Y_{S-1} = V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3} - L_{E3} \cdot X_{E3}$$

$$V_{S-2} \cdot Y_{S-2} = V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3} + L_{S2} \cdot X_{S2} - L_{E3} \cdot X_{E3} - L_{E2} \cdot X_{E2}$$

$$V_E \cdot Y_E + L_{E3} \cdot X_{E3} + L_{E2} \cdot X_{E2} + L_{E1} \cdot X_{E1} = V_S \cdot Y_S + L_{S3} \cdot X_{S3} + L_{S2} \cdot X_{S2} + L_{S1} \cdot X_{S1}$$

Bilan énergétique :

1^{er} Compartiment

$$V_E \cdot C_{pE} \cdot (T_E - T_{S-2}) = L_{E1} \cdot C_{pE1} \cdot (T_{S1} - T_{E1})$$

$$T_{S-2} = T_E - \frac{LE1.CpE1}{VE.CpE} \cdot \Delta T_{1(l)}$$

2ème Compartiment

$$V_{S-2} \cdot Cp_{S-2} \cdot (T_{S-2} - T_{S-1}) = L_{E2} \cdot Cp_{E2} \cdot (T_{S2} - T_{E2})$$

$$T_{S-1} = T_{S-2} - \frac{LE2.CpE2}{VS-2.CpS-2} \cdot \Delta T_{2(l)}$$

3ème Compartiment

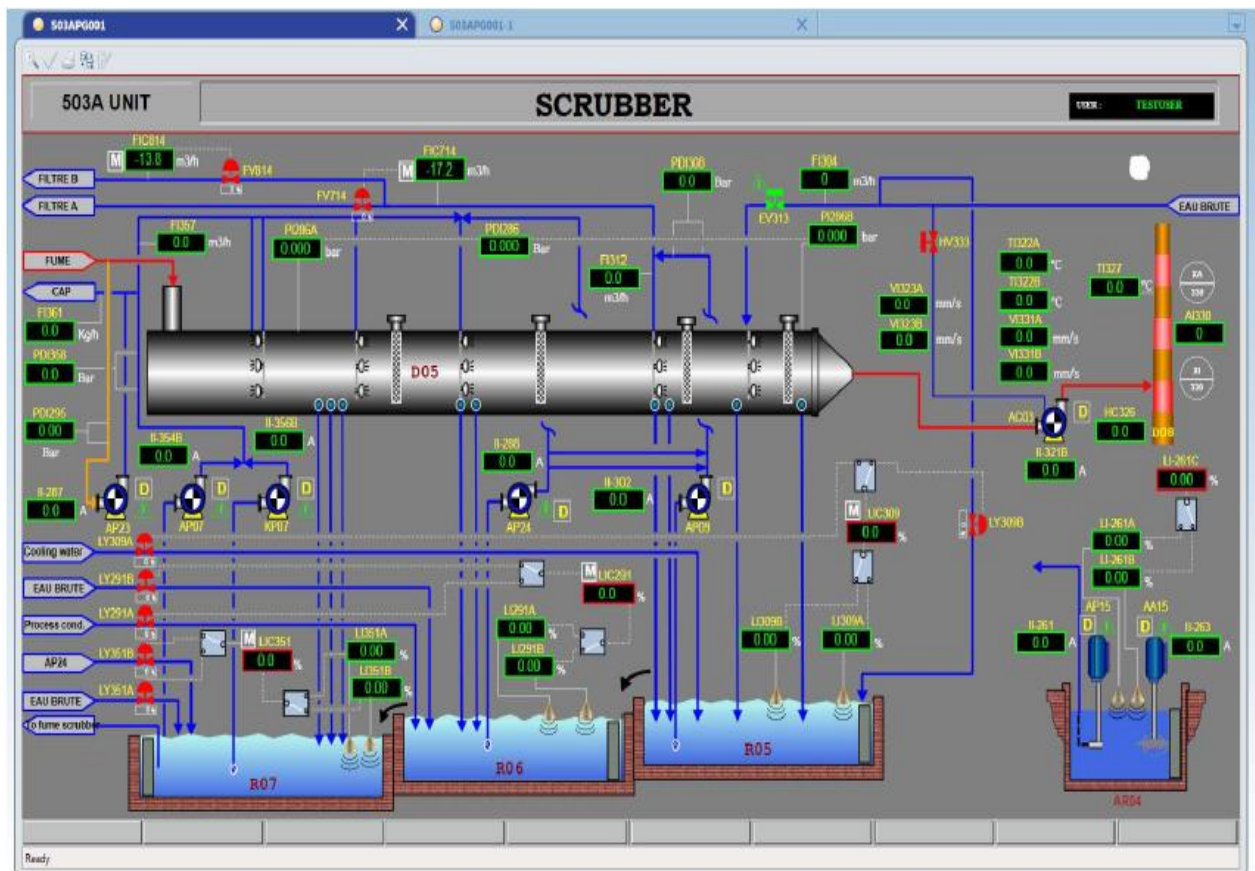
$$V_{S-1} \cdot Cp_{S-1} \cdot (T_{S-1} - T_S) = L_{E3} \cdot Cp_{E3} \cdot (T_{S3} - T_{E3})$$

$$T_S = T_{S-1} - \frac{LE3.CpE3}{VS-1.CpS-1} \cdot \Delta T_{3(l)}$$

$$T_{S-1} = T_E - \frac{LE1.CpE1}{VE.CpE} \cdot \Delta T_{1(l)} + \frac{LE2.CpE2}{VS-2.CpS-2} \cdot \Delta T_{2(l)}$$

$$T_E = T_S + \frac{LE1.CpE1}{VE.CpE} \cdot \Delta T_{1(l)} + \frac{LE2.CpE2}{VS-2.CpS-2} \cdot \Delta T_{2(l)} + \frac{LE3.CpE3}{VS-1.CpS-1} \cdot \Delta T_{3(l)}$$

Annexe 3 : Figures





Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom : BOUKRIES Naoufal

Titre : Etude d'efficacité de laveur des gaz au sein de l'unité de production d'acide phosphorique et optimisation de sa configuration.

Résumé

Le présent travail s'intègre dans le cadre de la politique du groupe OCP qui consiste d'une part à améliorer son niveau de performance et d'être un système de référence mondiale pour les industries de process continu sur le marché du phosphate, et à répondre aux normes des associations de l'environnement d'autre part.

Dans ce sens, il nous a été confié de travailler sur l'optimisation de la configuration de laveur des gaz au sein de l'unité d'acide phosphorique de l'entité JFC2, l'une des installations de lavage des gaz les plus modernes sur le site JORF LASFAR.

Des actions d'efficacité concernant le rendement chimique et le rendement thermique de cet équipement, ont été instaurées.

Ce travail inclut également une étude de perte de charge pour identifier les problèmes qui sont produits lors de la marche normale de l'équipement.

Mots clés : acide phosphorique, rendement chimique, rendement thermique, perte de charge, plan d'expérience.

